

UNIVERSITE DU QUEBEC À MONTREAL

ÉVALUATION DE L'OFFRE ANTHROPOMÉTRIQUE
POUR LA CONCEPTION DE PRODUITS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
FRANÇOIS RANGER

MARS 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 -Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

À Luce et Yvan,

À Lise et Jacques,

REMERCIEMENTS

Je tiens à transmettre mes plus sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui ont permis d'assurer la réussite de cette recherche.

D'abord, à mon directeur de recherche, M. Steve Vezeau, professeur et directeur au DESS en design d'équipements de transport de l'UQAM et du Groupe 3D, laboratoire de recherche en design et en ergonomie, pour qui la découverte est liée à la persévérance, à la passion, mais également au plaisir.

Je transmets également mes remerciements les plus chaleureux à Mme Monique Lortie (co-directrice), professeure et directrice du DESS d'ergonomie de l'UQAM, pour avoir partagé ses connaissances considérables et m'avoir guidé à des moments stratégiques de la recherche.

Mes remerciements particuliers à MM. Nicolas Gagné et Daniel Spooner pour leurs précieux commentaires et les conversations animées qui m'ont porté à préciser mes réflexions.

Je tiens aussi à remercier vivement Marie Bellemare et Pierre-Henry Dejean pour leurs précieux conseils.

Je ne peux passer sous silence la participation de Mesdames Hélène Vanghent, Priscille Hastey, ainsi que Messieurs Michael Kilbertus et Alexandre Morel, qui ont tous apporté une aide grandement appréciée.

Encore une fois, à mes parents ... Merci ! Pour votre support, vos mots d'encouragement et d'avoir toujours cru en moi.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
RÉSUMÉ	x
CHAPITRE I.....	1
1.1 À L'ORIGINE DE LA RECHERCHE : DES INCONFORTS LIÉS AU DIMENSIONNEMENT INADÉQUAT	1
1.2 L'ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	4
1.2.1 En design, la conception se fait à partir du "package ergo"	4
1.2.2 Les limites que peuvent présenter les données anthropométriques	5
1.2.2.1 L'accessibilité et la diffusion des bases de données.....	6
1.2.2.2 Évolution de la morphologie humaine	6
1.2.2.3 Absence de certaines variables anthropométriques	7
1.2.2.4 Les mesures dynamiques.....	8
1.2.2.5 La présence des vêtements	8
1.2.2.6 Le problème du choix des sujets	9
1.3 LES SIMULATIONS VIRTUELLES : UNE PISTE PROMETTEUSE	10
1.3.1 Les limites des représentations digitales humaines (RDH).	11
1.4 LES OBJECTIFS DU TRAVAIL	12
1.5 LES HYPOTHÈSES DE RECHERCHE.....	13
1.6 L'ORGANISATION DU TEXTE	13
CHAPITRE II	15
2.1 SURVOL HISTORIQUE	15
2.2 LES OUTILS ANTHROPOMETRIQUES OFFERTS AUX DESIGNERS.....	16
2.3 DESCRIPTION ET CRITIQUE DES OUTILS ANTHROPOMÉTRIQUES OFFERTS AUX DESIGNERS INDUSTRIELS.....	17
2.3.1 Variables analysées	18
2.3.2 Analyse et interprétation des données	18

2.4	COMPARAISON DE SEGMENTS ANATOMIQUES À PARTIR DE DIFFÉRENTES BASES DE DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES	18
2.4.1	Variables analysées	20
2.4.2	Analyse et interprétation des données	21
2.5	ANALYSE CRITIQUE DE TROIS LOGICIELS AVEC MODULE ANTHROPOMÉTRIQUE.....	21
2.5.1	Variables analysées	21
2.5.2	Analyse et interprétation des données	22
2.6	COMPARAISON DE SEGMENTS ANATOMIQUES À PARTIR DE TROIS LOGICIELS POSSÉDANT UN MODULE ANTHROPOMÉTRIQUE	23
2.6.1	Variables analysées	23
	CHAPITRE III	24
3.1	L'ANTHROPOMÉTRIE	24
3.2	SURVOL HISTORIQUE	25
3.2.1	Segments, outils et techniques de mesure	30
3.3	LES OUTILS ANTHROPOMÉTRIQUES OFFERTS AU DESIGNERS INDUSTRIELS	31
3.3.1	Les populations.....	32
3.3.3	Les formats de présentation.....	34
3.3.3.1	Les enquêtes (données brutes).....	35
3.3.3.2	Les abaques	35
3.3.4	Les représentations digitales humaines (RDH) — Digital Human Modeling (DHM)	36
3.4	DESCRIPTION ET REVUE CRITIQUE DES OUTILS OFFERTS AUX DESIGNERS INDUSTRIELS.....	37
3.4.1	Les grandes enquêtes	41
3.4.1.1	CAESAR.....	41
3.4.1.2	NHANES	41
3.4.1.3	ANSUR.....	42
3.4.1.4	Les enquêtes pour enfants	42
3.4.1.5	Synthèse critique des enquêtes	43
3.4.2	Les abaques les plus utilisés au Québec	43
3.4.2.1	The human scale (Diffrient et al., 1981).....	43
3.4.2.2	The measure of man and woman (Tilley, 1993).....	45
3.4.2.3	Human Dimension & Interior space (Panero et Zelnik, 1979).....	46

3.4.2.4	Synthèse critique des abaques	47
3.4.3	Les représentations 3D	49
3.4.3.1	Les logiciels conçus à partir de numérisation d'humain	49
3.4.3.2	Les logiciels d'analyse ergonomique et de CAO avec module anthropométrique	50
3.5	SYNTHÈSE	50
CHAPITRE IV		52
4.1	COMPARAISON DES DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES UTILISÉES	52
4.1.1	Comparaison entre deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires présentant un intervalle de 42 ans	53
4.1.2	Comparaison entre deux enquêtes, l'une civile et l'autre militaire	56
4.1.3	Comparaison entre les données de CAESAR et trois abaques	58
4.2	INCOHÉRENCES LIÉES AUX MANIPULATIONS DES DONNÉES	62
4.3	SYNTHÈSE	66
CHAPITRE V		68
5.1	HISTORIQUE	68
5.2	MANNEQUIN NUMÉRIQUE : UNE NOUVELLE FORME DE REPRÉSENTATION DE L'HUMAIN	70
5.3	DESCRIPTION DES LOGICIELS ANTHROPOMÉTRIQUES ANALYSÉS	71
5.4	ANALYSE CRITIQUE DES LOGICIELS ANTHROPOMÉTRIQUES SÉLECTIONNÉS	73
5.4.1	L'apparence des mannequins	73
5.4.2	Caractéristiques anatomiques des mannequins	76
5.4.3	La construction des mannequins : choix de populations, de variables anthropométriques, de mesures et centiles	79
5.4.4	Distribution de la masse grasseuse chez les mannequins	83
5.4.5	La manipulation des mannequins	86
5.4.5.1	Les postures prédéterminées	86
5.4.5.2	La cinématique directe	88
5.4.5.3	La cinématique inverse	88
5.4.5.4	Analyse des zones d'atteinte	89
5.4.6	LA VISION	90
5.5	COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES DES LOGICIELS ANTHROPOMÉ- TRIQUES ET LES ENQUÊTES CAESAR	91
5.6	SYNTHÈSE	94

CHAPITRE VI.....	96
6.1 DES ÉCARTS IMPORTANTS ENTRE LES DIFFÉRENTES SOURCES	97
6.2 L'AVANTAGE DES REPRÉSENTATIONS 3D	99
6.3 CERTAINS FORMATS DE PRÉSENTATION FAVORISENT LES ERREURS	100
6.4 DIMENSIONNER EN FONCTION DE LA POPULATION ET DES MESURES LES PLUS IMPORTANTES	101
6.5 LIMITES ASSOCIÉES À LA RECHERCHE	103
6.6 AXES DE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRE	103
6.6.1 L'activité des designers	103
6.6.2 La précision lors de l'utilisation de la donnée	104
6.6.3 L'innovation passe aussi par l'acquisition d'une bonne information	104
6.7 CONCLUSION GÉNÉRALE	105
APPENDICE A.....	107
APPENDICE B.....	110
APPENDICE C.....	115
RÉFÉRENCES	117

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : The Anthropometric Design Process. (Molenbroek, 2005.)	5
Figure 1.2 : Le « Third Age Suit ». (Ford Motor Company: eNews 5 juillet, 2006.)	9
Figure 3.1 : Système de mesure égyptien gravé sur granite noir. (yahwebkingisrael.blogspot.com)	26
Figure 3.2 : Le modulator. (Le corbusier, 2000.)	27
Figure 3.3 : Relevé du signallement anthropométrique. (http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphonse_Bertillon)	29
Figure 3.4 : Toise de Martin. (Roebuck, 1995.)	31
Figure 3.5 : L'offre anthropométrique	32
Figure 3.6 : Cartes plastifiées de l'abaque. (Diffrient et al., 1981.)	44
Figure 3.7 : Planche de l'abaque. (Tilley, 1993)	46
Figure 3.8 : Planche de l'abaque. (Panero et Zelnik, 1797)	47
Figure 3.9 : Scans 3D, enquête CAESAR	49
Figure 4.1 : Distribution de deux variables anthropométriques. (Dainoff et al., 2004.)	65
Figure 4.2 : Addition des exclusions. (Dainoff et al., 2004.)	66
Figure 5.1 : The First Man. (Fetter 1982.)	70
Figure 5.2 : Apparence des mannequins numériques	73
Figure 5.3 : Les différents styles offerts par ManneQuinELITE	75
Figure 5.4 : Superposition Humaine (jaune pâle) et Forme humaine ManneQuinElite (bleu foncé)	75
Figure 5.5 : Comparaison entre un mannequin femme Jill de NX et Gizelle de Poser	76
Figure 5.6 : Déplacement de l'épaule pour Catia	78
Figure 5.7 : représentation avec mesures atypiques VS la représentation du 97.5°	82
Figure 5.8 : Distribution de la masse grasseuse chez les hommes	84
Figure 5.9 : Distribution de la masse grasseuse chez les femmes	84
Figure 5.10 : Limites articulaires pour Catia	88
Figure 5.11 : Zone d'atteinte et analyse du confort dans NX (posture de conduite automobile)	89
Figure 5.12 : Simulation sur Catia du champ visuel pour un conducteur d'un chariot élévateur	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Mots clés survol historique	16
Tableau 2.2 : Mots clés, portrait des bases de données anthropométriques offertes	16
Tableau 2.3 : Ouvrages anthropométriques sélectionnés pour la description et la critique	17
Tableau 2.4 : Ouvrages anthropométriques sélectionnés pour les comparaisons	19
Tableau 2.5 : Segments comparés	20
Tableau 2.6 : Aspects et variables pour les logiciels analysés	21
 Tableau 3.1 : Répartition au niveau ethnique, selon les populations étudiées	 34
Tableau 3.2 : Caractéristiques des récentes enquêtes, des abaques et logiciels avec module anthropométrique	38
 Tableau 4.1 : L'évolution morphologique selon la provenance de la population — Comparaison entre les variables anthropométriques de deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires pour les hommes	 54
Tableau 4.2 : L'évolution morphologique selon la provenance de la population — Comparaison entre les variables anthropométriques de deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires pour les femmes	56
Tableau 4.3 : Écarts morphologiques selon la provenance de la population — Comparaison entre une enquête civile et une enquête militaire pour l'homme	57
Tableau 4.4 : Écarts morphologiques selon la provenance de la population — Comparaison entre une enquête civile et une enquête militaire, pour la femme	57
Tableau 4.5 : Écarts morphologiques selon la provenance des abaques, outils privilégiés par les designers industriels Comparaison entre l'enquête CAESAR et trois abaques, pour les hommes	59
Tableau 4.6 : Écarts morphologiques selon la provenance des abaques, outils privilégiés par les designers industriels Comparaison entre l'enquête CAESAR et trois abaques, pour les femmes	61
Tableau 4.7 : Soustraction de mesures	63
Tableau 4.8 : Mesure de la largeur des hanches pour les hommes et femmes	64
Tableau 4.9 : Représentations frontières sur une ellipse	65
 Tableau 5.1 : Segments, articulations, degré de liberté des trois logiciels	 77
Tableau 5.2 : Caractéristiques communes liées à la construction des mannequins	80
Tableau 5.3 : Valeur modifiée pour la création d'une représentation avec des mesures atypiques	81
Tableau 5.4 : Caractéristiques liées à la manipulation des mannequins	87
Tableau 5.5 : Écarts entre certaines variables des logiciels et ceux de l'enquête CAESAR 1998-2000, puis les écarts entre les mêmes variables pour CATIA et l'enquête ANSUR (1988)	93
 Tableau 6.1 : Facteurs à prendre en considération	 101
Tableau 6.2 : Mannequins représentant les multiples variances pour trois mesures	102

RÉSUMÉ

Certains produits mal dimensionnés occasionnent des inconforts pour leurs utilisateurs. Plusieurs exemples sont répertoriés, notamment dans le domaine des produits médicaux, de l'aménagement des postes de travail, du mobilier de bureau et des habitacles de véhicule industriel. Le choix des ouvrages (tables, abaques, logiciels) utilisés par les concepteurs pour dimensionner semble être à l'origine de décisions erronées.

L'étude vise à analyser la cohérence des ouvrages et logiciels anthropométriques offerts aux designers industriels en comparant leur nature, contenu et format. Les mesures de segments anatomiques de différentes bases de données anthropométriques anciennes et récentes, puis civiles et militaires, et de trois logiciels avec modules anthropométriques ont été comparées. Plusieurs manipulations de représentations digitales humaines (RDH) ont été effectuées pour analyser les écarts de mesures selon leur apparence, leur mode de construction et la distribution de la masse adipeuse.

En accord avec les travaux de Stoudt, les résultats montrent que la stature des Nord-américains a augmenté de près de 40 mm en 42 ans. Des écarts importants de mesure entre les différentes sources sont aussi observés (20 à 97 mm). Ces écarts sont liés entre autres à l'immigration et l'obésité (poids, largeur des épaules, les circonférences de la poitrine, de l'abdomen et des hanches, la largeur au bassin et la longueur de la cuisse). Les résultats montrent également des écarts importants entre les données civiles et militaires, notamment plus de 40 mm pour les jambes. Sachant que les données offertes par les abaques et les logiciels anthropométriques sont d'avantages militaires et qu'elles datent, les concepteurs peuvent prendre des décisions erronées s'ils dimensionnent des produits pour des civils de demain. La manipulation des logiciels anthropométriques (RDH) montre également plusieurs incohérences, notamment sur le plan de la distribution de la masse grasseuse.

L'offre anthropométrique actuelle ne peut permettre aux designers industriels d'établir en amont du projet des dimensions précises permettant d'inclure un nombre élevé d'utilisateurs. Pour favoriser un meilleur dimensionnement, il faut développer des outils ou méthodes permettant aux designers de générer des représentations frontières (personas) finement calculées et surtout près du réel. De plus, pour élaborer des outils en meilleure adéquation avec leur pratique, une analyse de l'activité des designers industriels s'avère nécessaire pour mieux comprendre comment et quand ils dimensionnent.

Mots clefs : Biométrie, anthropométrie, dimensionnement, designers industriels, représentations digitales humaines (RDH), développement de produit.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit à l'intérieur d'un axe de recherche plus large opéré par le Groupe 3D, un laboratoire de recherche appliquée en design et en ergonomie de l'École de design de l'Université du Québec à Montréal, axe qui porte sur les outils de simulation numérique dans le processus de design. L'étude vise à présenter les outils anthropométriques offerts aux designers industriels lorsqu'ils dimensionnent les produits lors de la conception puis, à partir d'une démarche d'analyse et de comparaison de données, à évaluer la cohérence de certains ouvrages anthropométriques susceptibles d'être utilisés lors de cette activité de dimensionnement.

Dans ce chapitre introductif, nous précisons d'abord la problématique et les raisons de la recherche, notamment qu'un problème d'inconfort associé à l'utilisation de certains produits mal dimensionnés est à l'origine de celle-ci. Nous discutons de la prise en compte des données anthropométriques lors de la conception ainsi que certaines limites liées à leur utilisation. Nous mettons également en évidence la piste prometteuse que présentent les simulations virtuelles avec la nécessité d'offrir en amont des représentations plus fidèles des utilisateurs potentiels. Finalement, nous présentons l'organisation du mémoire.

1.1 À L'ORIGINE DE LA RECHERCHE : DES INCONFORTS LIÉS AU DIMENSIONNEMENT INADÉQUAT

Bon nombre de produits sont mal dimensionnés et plusieurs utilisateurs éprouvent des inconforts directement liés aux décisions des concepteurs en matière de dimensionnement. Plusieurs exemples de mauvaise conception de produits sont répertoriés dans la littérature,

notamment dans le domaine des produits médicaux, de l'aménagement des postes de travail, du mobilier de bureau et des habitacles de véhicule industriel.

Dans le domaine médical, Wiklund et al. (2006) montrent que 50% des instruments chirurgicaux conçus au départ pour une population masculine, sont trop larges et que leur prise en main est inconfortable. Les utilisateurs qui possèdent de petites mains, en l'occurrence les femmes, estiment que 80 à 90% des instruments sont inappropriés pour un usage particulier et plusieurs nécessitent l'application d'une force excessive.

On peut dresser le même constat pour l'aménagement de poste de travail. Vezeau et al. (1999) démontrent que les utilisateurs de cabinet de sablage au jet adoptent des postures contraignantes liées à un mauvais dimensionnement du poste de travail. La position de la hauteur de la fenêtre, des orifices pour maintenir le pistolet et la pièce à sabler, et les pédales permettant d'actionner le jet imposent une posture statique contraignante pour les épaules et le cou, notamment pour les personnes de petite taille.

Le secteur aérien connaît également des ratés. Une étude de la Joint Aviation Authorities (JAA), démontre que le passager en classe économique n'aurait pas assez d'espace (Quigley, 2001). Une mauvaise prise en compte du volume occupé par certains passages, aurait pour effet d'augmenter des délais lors d'évacuation d'urgence.

Sur le plan de la conception des véhicules industriels plusieurs problèmes d'inconfort sont observés. Les portiques à conteneurs français témoignent que la majorité

des inconforts sont liés à l'aménagement du poste de conduite. Selon Wang et al. (2003) ces inconforts sont associés, au mauvais emplacement des commandes (85%), au réglage insuffisant du siège en hauteur (42%), à l'appui dorsal inapproprié (61%) et à la visibilité déficiente (70%). Ces facteurs déterminent la position du conducteur dans l'habitacle.

En conception de produits, on peut entendre parfois certains fabricants mentionner que l'individu peut s'adapter. Or, l'adaptation à un mauvais dimensionnement se traduit souvent, pour certains utilisateurs, par l'adoption de postures contraignantes qui génèrent des inconforts et contribuent à accroître les risques d'apparition d'un trouble musculosquelettique (TMS) (Das et al., 1996). De plus, ce risque s'accroît si ces postures sont combinées avec d'autres facteurs de risque comme l'effort, le travail musculaire statique, l'exposition à certains agresseurs physiques, la répétition et l'invariabilité du travail ainsi que l'absence de période de repos (Cail et al., 1997). Indépendamment d'une compréhension adéquate que peuvent avoir les concepteurs sur l'activité des utilisateurs et qui pourrait conférer au projet des qualités ergonomiques supplémentaires, ces quelques exemples mettent en évidence un problème de base lié au dimensionnement du produit, point de départ du projet de design. L'activité de dimensionnement souvent nommée "Package ergo" dans le jargon des designers industriels (cf. section 1.2.1), demeure une étape importante du projet puisqu'elle permet de générer l'enveloppe du produit et de déterminer la localisation des organes de commandes en fonction de l'emplacement et du volume des composantes internes choisies, des données anthropométriques ainsi que la posture générale des utilisateurs. Dans le but d'établir des dimensions le plus près de la réalité possible en intégrant les dimensions corporelles comme point de référence, les concepteurs vont d'abord utiliser les mesures anthropométriques comme repères. Ces données sont considérées comme un outil important pour générer l'enveloppe et le confort pour les automobilistes (Roe, 1993) ou le confort des sièges de voiture et de train (Kolich, 2003; Baucher et Leborgne, 2006). Les concepteurs utilisent souvent en aval des mannequins en 2D qu'ils superposent à leur esquisse ou à l'intérieur d'un

logiciel de CAO. Selon plusieurs auteurs (Pheasant et Haslegrave, 2006; Kolich, op.cit.; Roe, 1993; Rebiffé et al., 1982; Robinette et McConville, 1981; Hertzberg, 1955), les dimensions des produits sont souvent établis à partir du 5e centile femme et le 95e centile homme. Robinette et McConville, (op.cit.) mettent cependant en évidence que les concepteurs éprouvent des difficultés à comprendre les limites associées aux modèles construits à partir de certains centiles frontières (cf. sections 4.2).

D'un point de vue statistique, les données anthropométriques offertes pour dimensionner un produit sont fiables et les enquêtes sont réalisées de façon consciencieuse et à grande échelle. Mais d'un point de vue ergonomique, est-ce que les ouvrages offerts permettent aux designers de dimensionner convenablement les produits ? Selon les nombreux exemples trouvés, il semble manifestement que ce ne soit pas le cas. Mais où se trouve le problème ? Au niveau de leur utilisation, leur format de présentation, de la compilation des données, de leur mise à jour, la perception de leur utilité, leur coût ? Une analyse de l'activité des designers serait utile pour identifier les difficultés que les designers rencontrent lors de l'utilisation des données anthropométriques, mais au préalable, une étude s'impose pour évaluer la cohérence des ouvrages. Peut-on recommander en toute confiance leur utilisation ? Si oui, doivent-ils être accompagnés de mise en garde ?

1.2 L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.2.1 En design, la conception se fait à partir du "package ergo"

Différents chercheurs ont élaboré des modèles intégrant les données anthropométriques dans le processus de développement de produit (Quarante, 1998; Cushman et Rosenberg, 1991; Bobjer et Janson, 1997; Sagot et al., 1998). Cependant, ces modèles sont généraux et ne permettent pas de connaître les étapes spécifiques du processus de l'activité du dimensionnement. Molenbroek (2005), a élaboré un cadre méthodologique plus détaillé du processus de dimensionnement (Fig. 1.1). Le modèle est intéressant, car il permet la prise en compte de différents éléments sur lesquels les concepteurs doivent réfléchir lors de l'activité du dimensionnement. Il souligne l'importance de cibler les groupes d'utilisateurs, leurs variables biométriques ainsi que les mesures importantes à prendre en considération. La

tâche, les postures, les vêtements ainsi que des facteurs additionnels comme des équipements ou outils, doivent également faire l'objet d'une attention particulière. L'ensemble des étapes permettra de déboucher vers l'élaboration de critères de conception. Molenbroek intègre à son modèle la question de la représentation des utilisateurs, mais dans quelle mesure les designers industriels dont la principale tâche est de concevoir un produit et non de manipuler des modèles statistiques sont-ils compétents pour s'assurer de cette représentativité ?

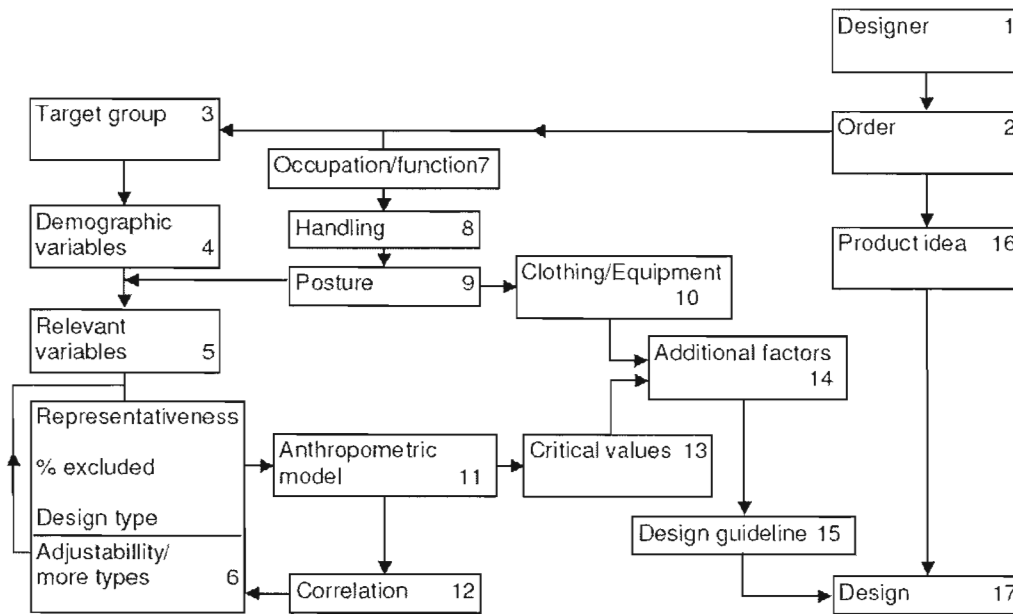


Figure 1.1 : The Anthropometric Design Process. (Molenbroek, 2005.)

1.2.2 Les limites que peuvent présenter les données anthropométriques

L'utilisation des données anthropométriques comporte certaines limites qui pourraient nuire, voire même induire les designers dans l'erreur et ainsi formuler de faux diagnostics lors de l'activité de dimensionnement. Voilà pourquoi il est important d'identifier les limites liées à leur utilisation et d'orienter nos efforts pour en diminuer les impacts négatifs.

1.2.2.1 L'accessibilité et la diffusion des bases de données

L'utilité des données anthropométriques pour dimensionner divers produits n'est plus à démontrer (Robinet et al., 2007; Robinette, 2003; Roebuck, 1993; Das, 1996). Elles permettent d'optimiser l'activité humaine et offrent de meilleurs ajustements entre les utilisateurs et les divers équipements de travail (Dainoff et al., 2004). Il existe une panoplie d'enquêtes, d'abaques, de tables et de logiciels qui permettent aux designers de dimensionner les produits (cf. chapitre 3). Les enquêtes sont généralement réalisées à l'intérieur d'un pays à la fois chez les hommes et les femmes. L'organisme "Crew System Ergonomics Information Analysis Center" (CSERIAC) possède près de 50 enquêtes, dont la majorité sont réalisées aux États-Unis (Unger, 1996). Certaines sont d'origine civile et d'autres militaires, ces dernières étant plus riches en nombre de segments mesurés. Selon les ouvrages, les données peuvent être présentées en 1D, 2D ou 3D. La première enquête, réalisée auprès des conscrits date de 1817 alors que la plus récente enquête civile date du début des années 2000. Certaines enquêtes sont gratuites alors que d'autres peuvent coûter jusqu'à 20 000 \$, ce qui limite leur accessibilité pour les plus petites organisations dont font partie la plupart des agences de design industriel. De plus, la majorité des données anthropométriques actuelles sont exclusivement accessibles aux commanditaires et partenaires de grandes enquêtes (Ferreira et al., 2004). La diffusion des données au grand public se fait trop tardivement et compromet l'accès à des données plus représentatives.

1.2.2.2 Évolution de la morphologie humaine

De nombreuses études ont mis en évidence les changements morphologiques qui s'opèrent chez l'être humain, au fil des décennies, principalement au niveau du poids et/ou de la taille (Cavelaars et al., 2000; Ogden et al., 2004; Robinet et al., 2007; Roe, 1993, Stoudt, 1979). Plus spécifiquement, un rapport sur la santé de 2006 de Statistique Canada révèle qu'au cours des 18 dernières années, la proportion de personnes obèses dans la population canadienne a augmenté de 53 %, passant de 15 % au cours de la période 1986 à 1992, à 23 % en 2004 (Statistique Canada, 2006). Roe (1993) mentionne que la population américaine a grandi à chaque année entre 1960 et 1974, présentant ainsi des écarts de 20 mm chez les hommes et 15 mm chez les femmes. Selon plusieurs études, la stature augmenterait de 10 mm par décennie chez plusieurs populations à travers le monde (Stoudt, 1979). Qu'en est-il

des autres segments? Aucune étude n'en parle. Le dimensionnement de certains produits ou systèmes demande la prise en considération de plusieurs segments. Il est donc important de connaître la nature de leur évolution au même titre que la taille et le poids.

1.2.2.3 Absence de certaines variables anthropométriques

L'absence de données présentées en fonction de certaines variables comme l'âge, le groupe ethnique ou le corps de métier empêche les concepteurs de réaliser des dimensionnements plus précis en fonction de marchés ciblés.

Avec l'âge, les utilisateurs connaissent certains changements liés à l'évolution des caractéristiques physiques et psychologiques. Sur le plan des dimensions corporelles, on observe une réduction au niveau des amplitudes articulaires et dû à l'affaissement de la colonne vertébrale, une réduction de la taille et de la hauteur des yeux en position debout et assise. Ces facteurs ne sont que quelques exemples qui peuvent affecter le volume occupé ainsi que la sûreté et la précision des mouvements (Kothiyal, 2001; Czaja, 1990). Pour l'activité de la conduite automobile, Chaffin et al. (2000), indiquent plus précisément que l'âge affecte les zones de préhension. Desrosiers (1994), ajoute que le côté évalué, gauche ou droit, a également un impact sur plusieurs paramètres et au niveau de la performance des membres supérieurs des personnes de 60 ans et plus. Il existe très peu d'ouvrages traitant de l'anthropométrie pour la population vieillissante, pourtant appelée à demeurer plus longtemps active (Czaja, op.cit.; Kothiyal, op.cit.).

Sur le plan ethnique, la nécessité d'avoir accès à des données spécifiques peut être importante lors de la conception de certains produits. C'est le cas notamment pour la conception de masques respiratoires. Yokota (2005) dresse le constat que la mixité ethnique aux États-Unis affecte la distribution des caractéristiques anthropométriques du visage et de la tête. Par exemple, la largeur de nez et la longueur des lèvres sont différentes entre les Afro-Américains et les Caucasiens. Kim (2003) a également noté des différences morphologiques significatives chez les Coréens qui occasionnent des problèmes d'ajustement au niveau des masques respiratoires conçus principalement pour des Caucasiens.

Des comparaisons effectuées par Hsiao (2002), mettent en évidence qu'il existe des variations pour certains corps de métiers. À titre d'exemple, les corps de métiers associés à la protection, comme les policiers et les gardiens de sécurité, présentent des mesures de statures, de poids, de circonférences du fessier et des cuisses significativement plus élevées que la population en général. On y constate également que les agriculteurs ont les poignets plus larges que chez les individus appartenant à d'autres corps de métiers (Hsiao, 2002). Les données sont rarement compilées en fonction de ces variables anthropométriques qui doivent être prises en considération, car elles caractérisent et changent le volume occupé par de "réels" utilisateurs.

1.2.2.4 Les mesures dynamiques

Le format de présentation peut représenter une limite en soi. Roe (1993), identifie deux types de mesures : la mesure conventionnelle statique en 1D et la mesure fonctionnelle relevée dans une posture contextualisée. La distinction entre les deux types est importante, car contrairement à la mesure statique en 1D, les données fonctionnelles permettent d'identifier la position d'un mannequin selon des coordonnées en trois dimensions (x,y,z). Les enquêtes populaires n'offrent généralement pas de mesures permettant de situer l'utilisateur dans l'action en fonction de postures spécifiques. De plus, les mannequins offerts en 2D ne possèdent pas d'articulations flexibles et complexes, c'est-à-dire adaptées au modèle humain (Roe, op.cit.). Il est alors plus difficile pour un designer d'établir avec précision, à partir d'une nouvelle posture, la plage d'ajustement optimal pour agripper un volant par exemple.

1.2.2.5 La présence des vêtements

Un autre exemple de problème susceptible de mener à des évaluations erronées touche le port de vêtements. La possibilité de faire des mesures avec des vêtements est rare bien qu'elles contribuent à rendre les simulations plus réalistes (Ruisseau et al., 2001). Par exemple, la présence de bottes d'hiver infère une différence au niveau de la taille de 25 à 38 mm chez l'homme et de 25 à 76 mm chez la femme (Diffrient et al., 1981).

1.2.2.6 Le problème du choix des sujets

Wisner (1993) et Sagot (1999) font le constat que les entreprises ont tendance à concevoir les produits pour des personnes en bonne santé, c'est-à-dire selon un modèle d'utilisateur « idéal » qui ne souffre d'aucune déficience, limitation d'activité, restriction de participation. Dans le même ordre d'idées, les tables anthropométriques portent essentiellement sur les dimensions corporelles générales. L'état de santé ainsi que les caractéristiques physiologiques et les déficiences « dites normales » comme la transformation des capacités physiques, du traitement de l'information, de la vision et de l'audition, sont rarement prises en considération. Ces éléments sont importants à considérer dans l'évaluation du produit, car ils peuvent transformer certaines déficiences « normales » en handicap lors de leur utilisation (Sagot, op.cit.). Fort heureusement, aujourd'hui l'apparition de nouveaux outils permet de prendre en considération de nouvelles caractéristiques biométriques. À titre d'exemple, le « Third Age Suit » (Fig. 1.2), fruit d'une collaboration entre Ford Motor et l'université de Loughborough permet aux ingénieurs de simuler certaines limites physiologiques liées au vieillissement : limites articulaires, réduction de la force et jaunissement du cristallin (Hitchcock et al., 2001). Les efforts déployés pour introduire certains paramètres biométriques rendent compte de la volonté d'être plus près des utilisateurs et forcent les concepteurs à dimensionner avec plus de précision, surtout aujourd'hui où le confort et la convivialité permettent de distinguer deux produits concurrentiels (Gomes et Sagot, 2001).



Figure 1.2 : Le « Third Age Suit ». (Ford Motor Company: eNews 5 juillet, 2006.)

1.3 LES SIMULATIONS VIRTUELLES : UNE PISTE PROMETTEUSE

Certains objets intermédiaires de la conception sont indispensables pour évaluer le ou les concepts (Jeantet, 1998). Les produits de la CAO comme objet de représentation intermédiaire de la conception peuvent aider l'ergonome et le concepteur à évaluer un produit en leur permettant d'exprimer simultanément, de manière objective et avec précision (mesures, angles, formes), des aspects perceptifs et fonctionnels du produit (Lebahar, 1997). Autrefois, la CAO était utilisée davantage en aval du processus, soit plus précisément lors de la phase de modélisation où les composantes internes étaient sélectionnées et le concept bien établi. Cette phase est généralement ponctuée d'irréversibilités où les changements sont associés impérativement à la triade coût-délai-qualité. Aujourd'hui, les pratiques et les avancées technologiques permettent de nouvelles opportunités. À titre d'exemple, les modules permettant d'accéder en ligne à des composants mécaniques modélisés via les catalogues de fournisseurs et le module "imaging & shape" module du logiciel de CAO CATIA offrent la possibilité d'effectuer plus facilement un passage entre les esquisses 2D et la modélisation 3D. Plus particulièrement, les simulations jumelées aux modèles numériques de l'homme et aux outils de CAO comme Jack®, Catia/Safework®, ManneQuinPRO™, Ramsis®, MAN3D, Bodyworks, Santos™, etc... constituent une des pistes prometteuses pour dimensionner le produit très tôt dans le processus et pour explorer à moindre coût différentes avenues conceptuelles et ainsi raccourcir les délais associés au développement de nouveaux produits. Dans le cadre de la conception du poste de conduite d'un TGV, Sagot (1999) a montré la pertinence de réaliser plus tôt dans le processus des simulations d'activité à partir de mannequins virtuels animés en simulant un mauvais réglage de siège avec le 5e centile masculin. Il devenait alors impossible pour le chauffeur d'apercevoir la voie ferrée devant lui et la signalisation basse, alors que cela est obligatoire sur le plan normatif. Cet exemple illustre la pertinence pour les concepteurs d'avoir en amont du projet, des mesures fonctionnelles, des points de référence en 3D du corps entier dans un contexte d'utilisation particulier (cf. section 3.3.4). Compte tenu des limites évoquées précédemment sur les données anthropométriques, la question qui se pose alors est : "dans quelle mesure" les données anthropométriques actuellement offertes par les logiciels sont-elles cohérentes pour les concepteurs ?

Des entretiens préliminaires montrent que plusieurs designers utilisent les maquettes pour dimensionner leur produit. Vezeau (2004) rapporte pour la conception des outils manuels : "que la manipulation des objets réels 3D ou des prototypes fonctionnels dans leur contexte d'utilisation est plus efficace pour rendre compte des gestes déployés et identifier les contraintes liées à l'utilisation d'un produit." Sans remettre en question l'utilité et la pertinence de procéder à des validations plus fines des concepts sous forme de maquette ou de prototype, la piste offrant aux designers industriels des outils d'évaluation le plus en amont possible du projet pour faciliter la conception et l'amélioration des solutions proposées sur le plan de l'ergonomie est pertinente, car plus le processus de conception progresse, plus il est difficile et coûteux de modifier le modèle et de remettre en cause certaines décisions (Naël, cité par Sagot, op.cit.). Les objets intermédiaires de la conception en 3D dans les projets de plus grande envergure sont dispendieux à construire et impliquent des mesures particulières en termes de sécurité (Chaffin, 2001).

1.3.1 Les limites des représentations digitales humaines (RDH).

L'offre au niveau des modèles numériques de l'Homme ne semble pas complète. Les modèles numériques de l'homme semblent prometteurs, cependant certains exemples mettent en évidence qu'il faudrait les utiliser avec prudence. Plusieurs chercheurs ont évalué les critères de conception de divers objets à l'aide de simulations 3D avec des modèles numériques de l'homme. Bellemare et al. (2003) constatent que le niveau d'abstraction et d'interprétation technique des mannequins ne présente pas un niveau de réalisme suffisant pour générer des discussions enrichissantes. De plus, l'absence d'information au niveau de la compressibilité des tissus adipeux, l'absence de vêtements et d'accessoires dont la prise en compte est très importante dans des habitacles très étroits ont mis également en évidence que certaines méthodes statistiques ne sont pas optimales lors de la création de représentations humaines virtuelles (Pinto et Taneja, 2005; Ruisseau et al., op.cit.; Kihyo et al., 2007). Condat (2002) souligne que leurs articulations semblent plus simples que celles du corps humain. En effet, l'absence de composantes anatomiques rend impossible la simulation de mouvements naturels, comme le bras qui s'étend vers l'avant. L'épaule est modélisée uniquement avec une articulation à rotule et la ceinture scapulaire sans omoplate mobile. Dans ce type de simulation, l'atteinte antérieure est trop courte et l'écart résultant est

considérable. On dresse le même constat pour l'articulation du genou où l'axe de rotation se déplace légèrement lorsque l'angle change.

Plusieurs équipes à travers le monde travaillent sur des représentations humaines virtuelles ou certains aspects plus particuliers. Le World engineering Anthropometry Resource (WEAR) oriente ses efforts sur la diffusion de base de données de plusieurs pays. Le Conseil National de Recherches du Canada (CNRC) travaille sur des méthodes permettant d'optimiser le résultat de scans d'individus en 3D de l'enquête "Civilian American and European Surface Anthropometry Resource" (CAESAR) ainsi que la possibilité de les animer. L'Université de Iowa VSR Team, Dassault Systemes, SIEMENS et NexGen Ergonomics concentrent individuellement leurs efforts sur la construction d'un modèle virtuel humain complet. Bref, plusieurs efforts sont faits pour améliorer l'offre anthropométrique numérique, mais dans quelle mesure ces outils sont-ils représentatifs pour aider à dimensionner ?

1.4 LES OBJECTIFS DU TRAVAIL

La revue de littérature a mis en évidence l'existence de problèmes d'inconforts générés par des mauvais dimensionnements. Au-delà des progrès technologiques en matière virtuelle et des outils qui permettent une meilleure prise en compte des caractéristiques biométriques, il est souhaitable de présenter préalablement l'offre anthropométrique, puis d'établir sa cohérence, car à la base, en design, la conception de certains produits se fait à partir du "package ergo". Nous savons que les données sont fiables au niveau statistique, mais peut-on les conseiller aux designers et penser qu'ils vont dimensionner convenablement leurs concepts ? Les formats de présentations des données facilitent-ils la prise de décision en matière de dimensionnement ?

Compte tenu de la problématique énoncée, les objectifs de notre travail sont:

Établir l'offre anthropométrique proposée aux designers industriels en recensant la nature, le format, les avantages et limites des principaux ouvrages et logiciels avec module anthropométrique susceptibles d'aider les designers à dimensionner les produits.

Comparer quelques segments anatomiques à partir de différentes bases de données et logiciels anthropométriques dans le but de recommander leur utilisation en toute confiance.

1.5 LES HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

La revue de littérature nous permet de formuler les hypothèses suivantes :

H1 : Le choix de l'ouvrage peut inférer des écarts élevés sur le plan du dimensionnement qui pourraient amener les concepteurs à mal dimensionner les produits.

H2 : Les abaques et logiciels avec module anthropométrique ne permettraient pas de générer des mannequins avec des morphologies variées que l'on retrouve dans les populations d'aujourd'hui.

1.6 L'ORGANISATION DU TEXTE

Le document a été organisé de manière à présenter l'offre anthropométrique proposée aux designers industriels et la comparaison de quelques segments.

Nous présentons au chapitre 2, la méthodologie de recherche et la manière avec laquelle nous avons approché la problématique.

Au chapitre 3, nous présentons l'offre anthropométrique à travers les ouvrages et outils mis à la disposition des designers pour déterminer correctement l'emplacement des organes de commande ainsi que les dimensions des produits.

Le chapitre 4 présente les ouvrages les plus utilisés par les designers, à partir de comparaisons effectuées entre différents segments relevés dans des enquêtes, des abaques et des logiciels avec module anthropométrique.

Le chapitre 5 présente une analyse de trois logiciels avec module anthropométrique. Notre analyse porte en particulier sur les fonctionnalités susceptibles d'être utiles lors du dimensionnement des objets. Nous montrons les avantages de tels systèmes, mais également

les limites qu'ils présentent. De plus, nous présentons la cohérence des données anthropométriques offertes par ces outils.

Le chapitre 6 expose une synthèse et une discussion des résultats au niveau de l'offre, c'est-à-dire la disponibilité des données ainsi que leur cohérence. L'emphasis est mise sur les constats généraux qui émanent de la recherche et qui permettent d'élaborer des recommandations au niveau des outils et ouvrages permettant une bonne prise en compte des caractéristiques anthropométriques. De plus, nous présentons plus spécifiquement les apports et les limites de la recherche.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les aspects méthodologiques déployés dans le cadre de cette étude qui s'articulent autour de six activités de recherche: i) un survol historique visant à tracer les origines de cette technique appelée "anthropométrie", ii) un recensement des ouvrages traitant de l'anthropométrie pour tracer un portrait de l'offre anthropométrique faite aux concepteurs de produits, iii) une description pour critiquer les principaux ouvrages utilisés par les designers industriels et iv) trois comparaisons de plusieurs mesures de segments issues des principales sources pour identifier la cohérence entre les différentes bases de données. De plus, nous examinons certaines incohérences liées à l'utilisation de l'offre en général. Puisque la CAO prend de plus en plus de place dans la conception : v) une revue critique de 3 logiciels avec module anthropométrique les plus populaires au Québec (CATIA, NX et ManneQuinElite) et vi) une évaluation de la cohérence des données présentées dans ces trois logiciels. Pour terminer, nous discutons de certaines mises en garde qu'il est nécessaire d'observer lors de l'utilisation des différents ouvrages traitant des mesures anthropométriques.

2.1 SURVOL HISTORIQUE

Le survol historique a pour but premier d'établir l'origine des premiers efforts liés à la technique de l'anthropométrie, mais également de comprendre comment les gens, avec les années, se sont appropriés la pratique de la mesure des segments : Quelles méthodes ont été utilisées ou sont encore utilisées ? Quelles sont les nouvelles technologies privilégiées ? La recherche a été principalement réalisée à partir des bases de données des bibliothèques de

l'Université du Québec à Montréal, de l'Université de Montréal, de l'École polytechnique et de l'Université de Sherbrooke. Nous avons centré nos recherches au niveau des monographies, des périodiques et sur internet avec les mots clés présentés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Mots clés survol historique

Français	Anglais
Origine de l'anthropométrie	The Origins of Anthropometric
Histoire de l'anthropométrie	Anthropometric History
Origine de la biométrie	The Origins of Biometric
Anthropologie / Anthropométrie	Anthropology / Anthropometric
Anthropométrie civile	Civilian Anthropometry
Anthropométrie militaire	Military Anthropometry
Bases de données anthropométriques	Database (NHANES, ANSUR)
	Anthropometric data
Poids, taille, indice de masse corporelle	Weight, height, stature, body mass index

2.2 LES OUTILS ANTHROPOMETRIQUES OFFERTS AUX DESIGNERS

Cette activité de recherche avait pour but de répertorier les bases de données, les ouvrages nord-américains¹ traitant de l'anthropométrie ainsi que les logiciels possédant un module anthropométrique. Les recherches se sont organisées de la même façon que pour l'origine de la technique de l'anthropométrie : mêmes institutions d'enseignement et mêmes types d'ouvrages littéraires, à la différence près que les mots clés évoqués ne sont pas identiques (Tab. 2.2). Les documents recensés sont recensés à annexe 1.

Tableau 2.2 : Mots clés, portrait des bases de données anthropométriques offertes

Français	Anglais
Anthropométrique	Anthropometric
Anthropométrie	Anthropometry
Anthropométrie civile	Civilian Anthropometry
Anthropométrie militaire	Military Anthropometry
Base de données anthropométriques	Database (NHANES, ANSUR, CASER)
	Anthropometric data
Biométrie	Biometric
Variables anthropométriques	
Mesures anthropométriques	
Centile	Percentile
Anthropométrie et design	Anthropometry and Design

¹ Compte tenu des difficultés d'accès aux bases de données récentes, nous nous sommes concentrés sur la population nord-américaine.

Inconfort	Injuries
Poids, taille, indice de masse corporelle	Weight, height, stature, body mass index
	Third age usability
	Anthropometric measurements in the elderly

Suite à l'exploration des différents documents sélectionnés, nous avons divisé les ouvrages en fonction de trois variables : i) les populations, c'est-à-dire civiles ou militaires, ii) la représentation spatiale (1D, 2D ou 3D) et iii) le format de présentation ou la manière dont les données sont présentées.

2.3 DESCRIPTION ET CRITIQUE DES OUTILS ANTHROPOMETRIQUES OFFERTS AUX DESIGNERS INDUSTRIELS

Le nombre de documents recensés et les délais associés à la recherche, présentait un défi de taille au niveau de la sélection des ouvrages. Partant de l'objectif que nous nous étions donné dès le début de nos recherches, nous avons d'abord sélectionné les ouvrages recommandés et utilisés dans les institutions d'enseignements offrant les programmes de design industriel et/ou de génie mécanique : l'Université du Québec à Montréal (l'École de design), l'Université de Montréal (l'École de design industriel) et l'École Polytechnique de Montréal (Génie mécanique). Par la suite, nous avons également sélectionné les plus importantes et récentes enquêtes civiles et militaires ainsi que les études auprès des enfants. Rappelons que l'objectif de cette activité de recherche est de réaliser une description afin d'effectuer une revue critique.

Tableau 2.3 : Ouvrages anthropométriques sélectionnés pour la description et la critique

Ouvrages	Auteurs
Enquête	
CAESAR : Summary statistics for the adult population (ages 18-65) of the United States of America	Harrison, (2002)
NHANES III (National Health and Nutrition Examination Survey)	
Military Handbook Anthropometry of U.S. Military Personnel 1988 U.S. Army Men (ANSUR)	Gordon, (1989)
Enfants	
Anthropometry of infants, children and youths to Age 18 for product safety	Snyder et al., (1977)
Strength characteristics of U.S. children for product safety design	Owings et al., (1975)
Abaques	
The measure of man and woman: human factors in design	Tilley, (1993)
Human scale 1/2/3/4/5/6/7/8/9	Diffrient et al., (1981)

Human Dimension & Interior space	Panero et Zelnik., (1979)
Logiciels de représentations digitales d'humains	
CATIA R16	Dassault systemes
NX 6	Siemens
ManneQuinElite V10.0	NexGen Ergonomics

2.3.1 Variables analysées

Les ouvrages ont d'abord été catégorisés par groupe d'individu (militaire, civile et enfant), puis ils ont été comparés en fonction des variables suivantes : format de présentation, année, coût, taille de l'échantillon, groupe d'âge, nombre de variables, types de mesures et centiles offerts.

2.3.2 Analyse et interprétation des données

Nous avons relevé et compilé l'ensemble des informations dans une base de données montée dans le logiciel Excel. Un tableau synthèse a été réalisé dans le but de faciliter la comparaison de l'ensemble des variables.

2.4 COMPARAISON DE SEGMENTS ANATOMIQUES À PARTIR DE DIFFÉRENTES BASES DE DONNÉES ANTHROPOMETRIQUES

Dans le but d'évaluer la cohérence des données, nous avons réalisé trois comparaisons à la fois pour les femmes et les hommes :

1. Transformation des dimensions corporelles avec le temps d'une population civile et militaire.

Dans un premier temps, nous avons comparé les mesures de 19 segments de deux enquêtes civiles (CAESAR 1998-2000 _ NHES I 1960-62) et deux enquêtes militaires (ANSUR 1988 _ U.S. Army Men 1946), pour évaluer si, à l'instar des travaux de Roe (1993), il y avait des signes de transformations morphologiques qui se reflétaient avec le temps dans les bases de données anthropométriques. Les ouvrages choisis présentent tous deux un écart d'âge d'une quarantaine d'années, soit respectivement 40 ans et 42 ans.

2. Écarts des dimensions corporelles selon la provenance de la population.

Nous avons comparé les mesures de segments entre l'enquête civile CAESAR 1998-2000 et l'enquête militaire ANSUR 1988, les deux plus récentes enquêtes, afin de broser un portrait plus complet au niveau des différences morphologiques des deux populations.

3. Écarts morphologiques selon la provenance des abaques, outils privilégiés par les designers industriels.

Nous avons également comparé les mesures de segments de trois abaques avec l'enquête civile CAESAR 1998-2002. L'intérêt ici est d'ausculter de plus près les changements que présentent certaines mesures de segments avec les années.

L'ensemble des bases de données ayant servi aux différentes comparaisons est présenté au tableau 2.3. La majorité des comparaisons a été faite avec la base de données CAESAR, car il s'agit de la base de données anthropométrique civile la plus récente. Elle a été construite avec rigueur, donc très crédible ; plus de 2 400 nord-américains et 2 000 européens ont été investigués.

Tableau 2.4 : Ouvrages anthropométriques sélectionnés pour les comparaisons

Ouvrages	Auteurs
Enquête	
Military Handbook Anthropometry of U.S. Military Personnel 1988 U.S. Army Men (ANSUR)	Gordon, (1989)
NAHES I: Weight, Height, and Selected Body Dimensions of Adults, United States, 1960-1962.	Stoudt et al., (1965)
CAESAR : Summary statistics for the adult population (ages 18-65) of the United States of America	Harrison, (2002)
Abaques	
The measure of man and woman: human factors in design	Tilley, (1993)
Human scale 1/2/3/4/5/6/7/8/9	Diffrient et al., (1981)
Human Dimension & Interior space	Panero et Zelnik, (1979)

2.4.1 Variables analysées

Pour effectuer les comparaisons à la fois chez les femmes et les hommes, nous avons sélectionné 19 variables anthropométriques de même appellation, à la fois pour des membres supérieurs et inférieurs. L'ensemble de ces données permet de délimiter partiellement le volume occupé par un individu en position statique neutre debout et assis. Parmi ces variables, nous avons sélectionné le poids, quatre circonférences, ainsi que quinze mesures linéaires. Pour assurer une uniformité au niveau des termes, le tableau 2.2 présente le terme en français et en anglais pour chacune des variables anthropométriques.

Tableau 2.5 : Segments comparés

Terme français (traduit)	Terme anglais
Posture debout	
Poids (Kg)	Weight (Mass)
Stature	Stature (Body Height)
Circonférence de la tête	Head Circumference
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs	Thumb Tip Reach, Right
Largeur aux épaules	Shoulder Breadth (Bideloid)
Circonférence de la poitrine	Bust/Chest Circumference
Circonférence de l'abdomen	Waist Circumference, Preferred
Circonférence des hanches	Hip Circumference, Maximum
Largeur des hanches	Hip Breadth, Standing
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)	Bi-Trochanteric Breadth,
Hauteur de la jambe	Crotch Height
Posture assis	
Hauteur du buste (hauteur assise)	Sitting Height
Hauteur des yeux	Eye Height, Sitting, Right
Longueur du bras	Shoulder-Elbow Length, Right
Longueur de l'avant-bras	Elbow-Fingertip Length, Right
Largeur au bassin	Hip Breadth, Sitting
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)	Bi-Trochanteric Breadth, Sitting (Comfortable)
Longueur de la cuisse (fesse-genou)	Buttock-Knee Length, Right
Hauteur de la jambe (genou-sol)	Knee Height, Sitting, Right

Dans le but d'optimiser le nombre de comparaisons possibles, nous avons sélectionné, pour chacune des mesures, les centiles les plus offerts pour l'ensemble des ouvrages sélectionnés soit le 5e, 50e et 95e. L'ouvrage de Tilley (1993), "The measure of man and woman: human factors in design", n'offrant pas les mêmes centiles, nous présentons les écarts pour le 1er, 50e et 99e centile.

2.4.2 Analyse et interprétation des données

Selon la disponibilité des données, nous avons calculé l'écart pour chaque segment et arrondi les valeurs au millimètre près. L'ensemble des écarts, pour les trois comparaisons, est présenté dans des tableaux distinctifs pour les femmes et les hommes.

2.5 ANALYSE CRITIQUE DE TROIS LOGICIELS AVEC MODULE ANTHROPOMETRIQUE

Pour avoir une idée de l'état de l'art en matière de représentation numérique humaine, une revue critique a été menée avec trois logiciels : CATIA V5 R16, NX 6 et ManneQuinELITE v10.0. Ces derniers ont été sélectionnés à partir de logiciels disponibles dans des laboratoires de quatre universités dispensant des programmes liés à la conception de nouveaux produits : l'Université du Québec à Montréal (l'École de design), l'École de technologie supérieure (Génie mécanique), l'École Polytechnique de Montréal (Génie mécanique) et l'Université McGill (Génie mécanique).

2.5.1 Variables analysées

Nous présentons les variables qui ont guidé la critique et la catégorisation des informations qui a permis de tracer le portrait ainsi que la cohérence entre les différentes fonctions offertes. Compte tenu des délais liés à la réalisation de l'étude, nous n'avons pas été en mesure de comparer l'ensemble des fonctions offertes par les différents logiciels. Nous nous sommes principalement intéressés aux aspects et fonctions liés à l'anthropométrie. Le tableau 2.3, présente les variables associées à chacun des aspects.

Tableau 2.6 : Aspects et variables pour les logiciels analysés

Aspects	variables
Apparence des mannequins	Type de construction
Caractéristiques anatomiques	Nombre de segments
	Nombre de joints
	Nombre de degrés de liberté (DDL)
Caractéristiques liées à la construction	Populations disponibles ou enquêtes
	Nombre de variables anthropométriques
	Types de mesures offertes
	Centiles offerts

	Points de référence possibles
Distribution de la masse grasseuse	Avec et sans surcharge pondérale
Manipulation des mannequins	Nombre et types de postures prédéterminées
	Méthodes disponibles pour la manipulation
	Représentation des zones d'atteinte
	Type d'analyse de confort
La vision	Types de champs visuels offerts
	Valeur par défaut et maximale
	Distance

2.5.2 Analyse et interprétation des données

Pour chacun des aspects, nous avons relevé et compilé l'ensemble des informations dans le logiciel Excel. Des tableaux synthèses ont été réalisés dans le but de faciliter la comparaison au niveau de l'ensemble des variables. Pour mieux évaluer la manière dont les logiciels prenaient en compte la distribution de la masse grasseuse, nous avons superposé les images de mannequin homme et femme du 50e centile en taille et en poids sur des mannequins toujours du 50e centile en taille, mais avec un poids correspondant à un indice de masse corporelle (IMC) de 34,9². En 2004, 15,2 % des Canadiens adultes se trouvaient dans la classe I d'obésité, 5,1 %, dans la classe II et 2,7 %, dans la classe III. Nous avons sélectionné, pour cette manipulation, la valeur supérieure de la catégorie présentant le plus grand pourcentage de Canadiens atteints³. Pour chaque logiciel, nous avons fait une capture de l'écran des deux représentations, une vue de face et une vue de côté, c'est-à-dire avec et sans surcharge pondérale, puis à l'aide du logiciel Photoshop CS2, nous avons superposé les

² Se calcule en divisant le poids exprimé en kilogramme par la stature au carré exprimé en mètre. $IMC = \text{poids (kg)} / \text{Stature (m}^2\text{)}$. L'obésité a été subdivisée en trois catégories, la classe I (IMC de 30,0 à 34,9), à la classe II (IMC de 35,0 à 39,9), et celle de la classe III (IMC de 40 et plus).

³ Pour l'instant, au Canada, une équation unique est proposée aux hommes et aux femmes, bien que leur constitution soit différente. États-Unis, les méthodes de calculs se raffinent et proposent déjà une formule différente selon le sexe.

images des vues de côté et de face. L'indisponibilité du logiciel ManneQuinELITE, nous a obligés à réaliser les superpositions avec "HumanCAD", la nouvelle version du logiciel de Nexgen.

2.6 COMPARAISON DE SEGMENTS ANATOMIQUES À PARTIR DE TROIS LOGICIELS POSSÉDANT UN MODULE ANTHROPOMETRIQUE

Dans le but d'évaluer la cohérence des données présentées dans les logiciels, nous avons réalisé une quatrième comparaison :

4. Écarts des dimensions corporelles présentés entre les logiciels et la base de données civile CAESAR 1998-2000.

Dans le but d'évaluer la cohérence des données présentées dans les logiciels, nous avons comparé les écarts des mesures de segments corporels des trois logiciels avec l'enquête civile CAESAR 1998-2000.

2.6.1 Variables analysées

Nous avons d'abord généré, à partir de chacun des logiciels, trois mannequins hommes américains du 5e, 50e et 95e centile en stature et en poids. Pour chacun d'eux, nous avons relevé les mesures correspondantes aux 19 variables sélectionnées (cf. Tab. 2.2), puis avons établi les écarts entre les mêmes variables de l'enquête CAESAR. Compte tenu du fait que les centiles des variables anthropométriques des représentations du 5e et 95e centile de CATIA varient, à l'exception de la stature et du poids, nous avons sélectionné la fonction "manuel" pour chacune des 19 variables et avons fait correspondre pour l'ensemble des variables, le centile du poids et de la taille du mannequin. Pour effectuer les comparaisons, nous avons sélectionné les mêmes méthodes d'analyse et d'interprétation des données que pour les comparaisons antérieures.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION DE L'OFFRE ANTHROPOMÉTRIQUE

Ce chapitre vise à présenter plus précisément l'offre l'anthropométrie pour les designers industriels. Cette offre est établie en fonction de trois aspects : la population, la représentation spatiale et le format de présentation. Par la suite, nous présentons une description des plus importantes et récentes enquêtes civiles, militaires et pour enfants ainsi que les abaques utilisés dans les institutions d'enseignements offrant les programmes de design industriel et/ou de génie mécanique. Auparavant, nous proposons une définition de l'anthropométrie appliquée et un survol historique afin de témoigner de la façon avec laquelle les individus se sont appropriés la mesure des segments.

3.1 L'ANTHROPOMÉTRIE

Selon le dictionnaire le petit Larousse, l'anthropométrie se définit comme : la branche de l'anthropologie physique ayant pour objet, tout ce qui dans l'organisme humain, peut être mesuré (poids des organes, pression artérielle, etc.). Elle se définit également comme l'anthropologie judiciaire, méthode d'identification criminelle fondée essentiellement, de nos jours, sur l'étude des empreintes digitales et génétiques (ADN). La définition du petit Robert se rapproche davantage de l'anthropométrie appliquée soit : l'étude des proportions du corps humain ou comme la technique de mensuration du corps humain et de

ses diverses parties. Elle se définit également comme l'anthropométrie judiciaire, méthode d'identification des criminels par les mensurations.

Initialement, l'anthropométrie avait pour propos de relever certaines mesures sur des squelettes osseux dans le but de caractériser l'évolution de l'espèce humaine (Roebuck, 1995). Aujourd'hui, fruit d'une progression au niveau des méthodes de mesure, l'anthropométrie appliquée permet de déterminer le volume spatial occupé par le corps, la masse, mais également les zones d'atteinte lors d'un mouvement. Ces données permettent aux ingénieurs, designers industriels, ergonomes, ..., de concevoir des espaces et équipements pour un plus grand nombre d'utilisateurs ou encore de définir la fraction de la population prise en considération (Monod et Kapitaniak, 2003).

3.2 SURVOL HISTORIQUE

La fascination pour les proportions et la mesure du corps humain remonte à des temps très anciens. À l'époque de l'Égypte ancienne, les sculpteurs utilisaient déjà des grilles composées de 14 parties égales, dont les intersections correspondaient à des marqueurs anatomiques (Pheasant, 1986). L'Égypte antique a longtemps employé un système de mesures basé sur le corps humain. L'unité standard linéaire employée était la "Coudée royale"⁴ et une deuxième mesure plus petite appelée "Petite coudée"⁵. Ces mesures ont été inscrites sur du granite noir, puis des règles en bois graduées ou des tiges de coudées ont fait

⁴ La grande coudée ou coudée royale est égale à 7 paumes ou 28 doigts, soit 52,36 à 52,64 cm. La paume égale à 7,47 à 7,52 cm, elles-mêmes divisées en quatre doigts (environ 1,86 à 1,88 cm par doigt).

⁵ La petite coudée a comme base la longueur allant du coude jusqu'à l'extrémité de la main. C'est la coudée, dite naturelle, de vingt-quatre doigts égale à 6 paumes ou 1½ pied. Elle correspond donc à 24 doigts, soit 44,88 cm.

leur apparition (Fig 3.1). Les charpentiers égyptiens ont attaché une grande importance au niveau de l'exactitude et l'uniformité lors de la construction des meubles. Ils pouvaient prévoir une erreur de 2 mm (Killen, 2003).



Figure 3.1 : Système de mesure égyptien gravé sur granite noir.
(yahwehkingisrael.blogspot.com)

La quête d'une loi mathématique capable d'engendrer l'harmonie et la beauté, a longtemps occupé mathématiciens et philosophes de la Grèce antique. L'origine de ce rapport, connu aujourd'hui sous le terme « nombre d'or », est discutable dû à l'absence de documents d'époque. Toutefois, l'étude d'œuvres arts anciens contribue à nourrir l'hypothèse d'une origine très ancienne. Thalès de Milet (-624 ; -548) en mesurant la pyramide de Kheops à l'aide de son théorème, découvre que le rapport de la hauteur par sa demi-base est égal au nombre d'or. Cependant, des documents historiques prouvent que les Babyloniens avaient déjà travaillé sur des principes semblables, notamment le texte d'Euclide, « Les éléments » publiés vers 300 av. J.-C. Ce nombre mystique appelé également la section dorée, $\varphi = 1 + \sqrt{5} / 2 = 1,618$ a été utilisé par de nombreux peintres, architectes et sculpteurs de la renaissance. Léonard de Vinci et Albrecht Dürer ont élaboré des systèmes de proportions à partir de marqueurs anatomiques (Elam, 2005). En 1509, le moine Fra Luca Pacioli lui consacra le traité « Divina Proportione » (Cleyet-Michaud, 1972). Il a marqué également les travaux de l'un de nos grands architectes contemporains : Le Corbusier. Le

Modulor, présenté en avril 1947 par l'architecte français, est un système de mesures universelles basé sur les proportions du corps humain et qui tire son origine d'un problème de communication au niveau du dimensionnement entre les architectes, ingénieurs et artisans. (Fig 3.2). Le Corbusier crée des bâtiments et aménage des intérieurs suivant un tableau d'échelles de mesure du corps humain. Cette grille basée sur le nombre d'or devait permettre un confort maximal dans les relations entre l'homme et son espace vital (Le Corbusier, 2000). Toutefois, ces proportions correspondent au canon esthétique traditionnel et ne sont en aucun cas basées sur un plan d'échantillonnage. Evans (1995), rapporte que Le Corbusier, suite à plusieurs expériences, a dû baser ses calculs sur les dimensions d'un sujet anglais, car le français était trop court. Il en arrive donc au nombre 1.828 mètre. De plus, le corps de la femme a été tardivement considéré puis rejeté comme source d'harmonie proportionnelle. L'essai, contenu dans deux tomes, contient des notes et des dessins très difficiles à comprendre et démontre une ignorance flagrante des proportions humaines réelles. Le Modulor représente les tribulations d'un architecte essayant de trouver une solution universelle aux problèmes de proportion humaine (Ostwald, 2001). Du point de vue ergonomique cette volonté de déterminer des proportions harmonieuses est assez paradoxale si l'on tient compte de la grande variabilité observée chez une population.

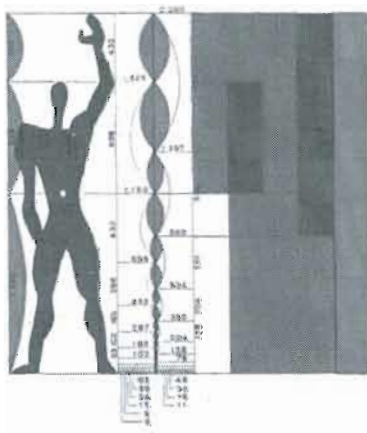


Figure 3.2 : Le modulor. (Le Corbusier, 2000.)

Pour sa part, l'anthropométrie, qui fait appel à la statistique descriptive, a longtemps été désignée par l'anthropologie physique, science qui étudie les groupes humains du point de

vue physique et biologique. Floud (2004), invité par Robert Fogel à travailler sur le déclin à long terme de la mortalité aux États-Unis entreprend de retracer les premières origines des données anthropométriques en Angleterre, berceaux de la civilisation américaine. Floud a découvert des documents relatant des millions d'observations individuelles sur l'armée britannique et la Marine Royale. Les plus anciennes datent de la première moitié du 18^e siècle où l'on y retrouve principalement la taille des individus (Floud et al., 1990). En France, selon Auerhan (1934), la statistique moderne tire également ses origines d'un passé séculaire en lien avec le domaine militaire. En effet, le premier ouvrage intitulé : "Recherches et considérations sur la formation et le recrutement de l'armée en France" par Hargenvilliers, date de 1817. Les premières enquêtes ont été réalisées auprès des conscrits, à l'occasion du recrutement, c'est-à-dire à presque toute la population masculine. Ces enquêtes laissent supposer, pour des raisons techniques et temporelles, qu'elles n'avaient pas pour objectif d'atteindre l'exactitude, mais plutôt d'établir un relevé physique qui permettait de justifier la qualification ou la non-qualification. L'analyse des données permet d'élaborer des constats intéressants. Villermé, pionnier de la médecine du travail, puise également ses connaissances dans l'anthropométrie française et constate en 1827 et 1829, que les citadins ont, en moyenne, une taille plus élevée que les paysans (Auerhan, op.cit.). A. Quetelet, fondateur de la statistique moderne, de l'indice de la masse corporelle et figurant également parmi les fondateurs de la biostatistique, en plus de faire le même constat que Villermé, observe que les données au niveau de la taille, du poids et du périmètre thoracique, oscillent autour de valeurs moyennes et que celles-ci tendent à être constantes (Quetelet, 1835). À cette époque, d'ores et déjà, on constate un début de compréhension au niveau de la variabilité morphologique au sein d'une même population. Villermé et Quetelet, vont établir que les variations biologiques sont influencées par des facteurs environnementaux et socio-économiques.

Alphonse Bertillon deviendra un important précurseur de l'anthropométrie appliquée. Embauché à titre de commis à la préfecture de Paris, en 1879, il constate le désordre qui régnait parmi les fiches permettant d'identifier les malfaiteurs récidivistes. Influencé par le travail des anthropologues que fréquentait son grand-père ainsi que les travaux de Quetelet sur la loi de distribution, il crée la police dite scientifique. Cette dernière consiste en un

système d'identification des criminels basé sur des mesures anthropométrique. C'est en 1882, que fut expérimenté pour la première fois, le matériel de Bertillonnage, un matériel servant à confiner 9 mesures du corps : la taille, l'envergure, le buste, la longueur de la tête, largeur de la tête, l'oreille droite, le pied gauche, le médius gauche, la coudée gauche (Fig. 3.3) (Bertillon, 1941). Sous les conseils du Dr Glaton, directeur du laboratoire d'anthropologie de Londres, il ajoutera aux fiches des malfaiteurs quelques empreintes digitales.

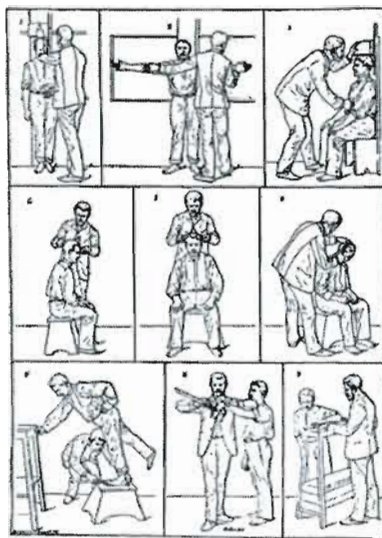


Figure 3.3 : Relevé du signalement anthropométrique.
(http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphonse_Bertillon)

En Amérique, avec les menaces du deuxième conflit mondial, les données contribuent à générer des solutions mieux adaptées aux militaires (Hertzberg, 1955). Les coûts associés aux enquêtes demeurent élevés, ce qui explique en partie pourquoi les armées demeurent les principaux maîtres d'œuvre en la matière. L'armée américaine a conduit plus de 40 enquêtes entre les années 1945 et 1988. Uniquement aux États-Unis, l'organisme Crew System

Ergonomics Information Analysis Center (CSERIAC)⁶ possède près de 50 enquêtes. Sur les 37 déjà analysées et disponibles au grand public, on compte 4 enquêtes civiles et 33 enquêtes militaires dont 21 proviennent des États-Unis (Unger, 1996).

3.2.1 Segments, outils et techniques de mesure

Avec le temps, le nombre de segments mesurés s'est également multiplié. Chapeauté par le CSERIAC, l'organisme Human Systems Information Analysis Center (HSIAC) a contribué à développer un système uniformisé — c'est-à-dire que chacune des mesures est identifiée par un code — une appellation distincte, une définition ainsi que des points de repère anatomique. Jusqu'à présent, on dénombre près de 343 mesures et 107 marqueurs anatomiques. Les erreurs possibles d'interprétation des données entre différentes enquêtes posent des problèmes (Hertzberg, 1968). À titre d'exemple, certaines enquêtes donnent la mesure pour la profondeur de l'abdomen alors que d'autres utilisent le terme profondeur de l'estomac. Comme second exemple, certaines enquêtes mesurent la circonférence de la taille au niveau du nombril, et d'autres, au niveau de la taille. Aujourd'hui, la norme internationale ISO 7250 ou la norme anthropométrique du Bureau de normalisation du Québec (BNQ) (Forest et Leclerc, 1995) présente la désignation et définition des mesures, mais les ouvrages anthropométriques ayant été pour la plupart rédigés avant la parution de la norme, il est fort à parier que ces exigences n'ont pas été prises en compte dans ces bouquins.

Les mesures sont obtenues préalablement par palpation à partir de marqueurs anatomiques (landmarks) puis identifiées sur la peau par un crayon dermatographique. Les mesures sont linéaires, c'est-à-dire en une dimension (1D). Les mesures sont prises à l'aide d'une trousse anthropométrique "la toise de Martin". Cet outil classique comprend 4 segments de 50cm mis bout à bout avec une règle coulissante. Une deuxième règle peut être ajoutée formant ainsi un pied à coulisse (Fig. 3.4). La trousse est complétée par un compas d'épaisseur, un ruban métrique inextensible, un goniomètre pour les mesures d'angle articulaires et un compas d'épaisseur pour les plis cutanés. La méthode de Morand est

⁶ The CSERIAC est une organisation américaine qui a pour objectif de faciliter, par différents moyens, la prise en compte d'humain dans la conception de produit ou système.

également utilisée en laboratoire. Elle consiste à relever les mesures à l'aide de deux panneaux verticaux, montés en équerre et recouverts de papier millimétré. La précision des mesures obtenues à l'aide d'un sabot que l'on déplace sur l'un des deux panneaux atteint le millimètre (Monod et Kapitaniak, 2003; Roebuck, 1995). Certains dispositifs spéciaux permettent de mesurer les doigts, le diamètre des prises en main ou les pieds, comme les gabarits circulaires, le cornet pour la mesure de la prise en main et la boîte avec le sabot coulissant pour la longueur et largeur des pieds (Roebuck, op.cit.). Différentes méthodes et outils comme le "seating buck mannikin", "SAE fixture for measuring control reach" ou "H-point" ont vu également le jour pour établir des mesures spécifiques liées à l'industrie de l'automobile ou de l'aérospatiale (Reed et al., 1999; Robinet et al., 2007 ; Roebuck, op.cit; Roe, 1993). Aujourd'hui, les méthodes de mesures se sont raffinées surtout avec l'arrivée de nouvelles technologies comme la numérisation 3D d'humains (cf. section 3.4.3.1).

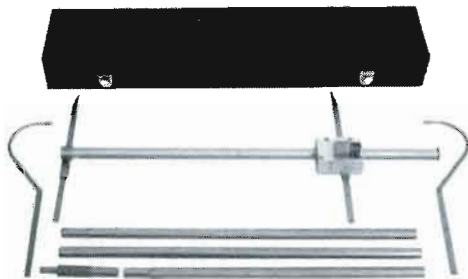


Figure 3.4 : Toise de Martin. (Roebuck, 1995.)

3.3 LES OUTILS ANTHROPOMETRIQUES OFFERTS AU DESIGNERS INDUSTRIELS

Nous avons répertorié un ensemble d'outils permettant aux designers de dimensionner des produits. L'annexe I présente l'ensemble des outils. Suite à l'exploration des différents documents, nous présentons l'offre en fonction de trois variables : i) les populations, c'est-à-dire civiles, militaires et enfants, ii) la représentation spatiale (1D, 2D ou 3D) et iii) le format de présentation (les enquêtes, les abaques, les représentations issues de numérisation d'humain et les logiciels ergonomiques intégrés ou non à des logiciels de CAO) (Fig. 3.5).

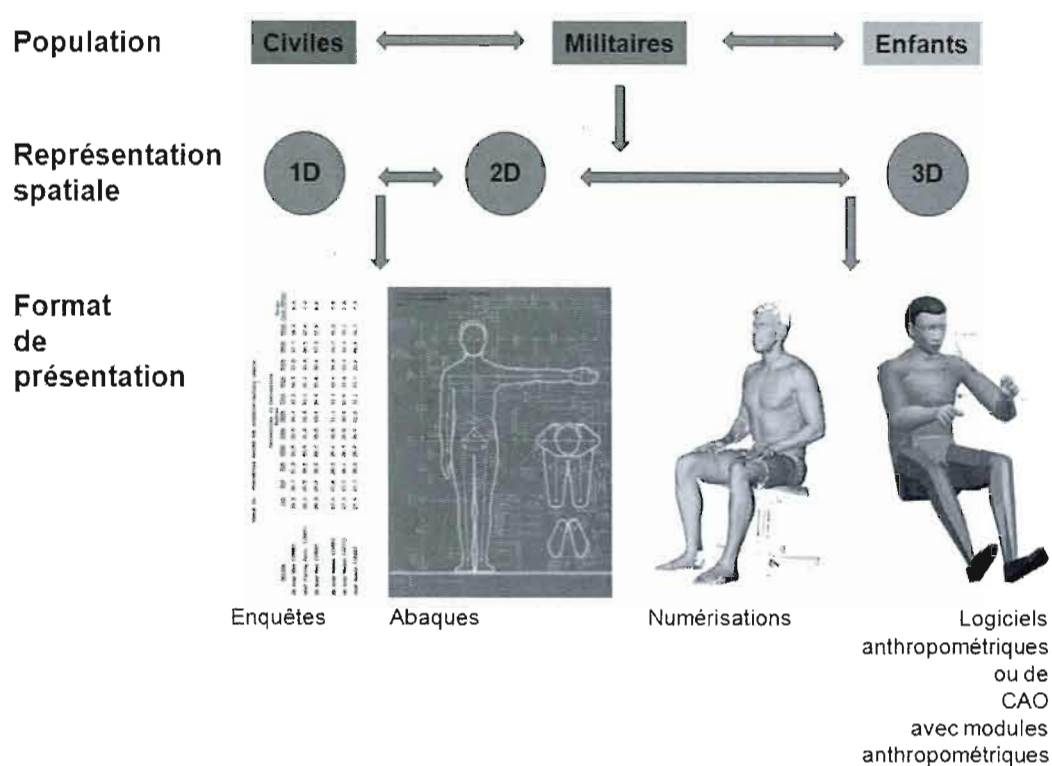


Figure 3.5 : L'offre anthropométrique

3.3.1 Les populations

Comme nous le démontrerons aux chapitres 4 et 5, l'ensemble des outils offerts aux designers industriels tirent leur source de grandes enquêtes. Selon les ouvrages recensés et présentés en annexe 1, il y a eu très peu d'enquêtes civiles. Les plus importantes et récentes sont CAESAR⁷ et NHANES⁸ III. La majorité des enquêtes sont donc d'origine militaire.

⁷ Civilian American and European Surface Anthropometry Resource (Harrison et al., 2002)

⁸ National Health and Nutrition Examination Survey (The National Center for Health Statistics, 1988-1994)

L'ANSUR⁹ est la plus récente et importante enquête militaire jamais réalisée. On compte également quelques enquêtes réalisées auprès d'enfants. Habituellement, les rapports des enquêtes précisent le ou les lieux de l'enquête (territoire d'un pays), l'échantillon, le nombre des individus selon l'âge, le genre ainsi que le nombre de variables mesurées. Aujourd'hui, la grande majorité des enquêtes nord-américaines sont conduites chez des adultes de 18-65 ans (cf. tableau 3.2). La taille de l'échantillon peut varier allant de 33 994 participants pour (NHANES III) à 498 pour Strength characteristics of U.S. children for product safety design. Il est important pour les designers d'utiliser des ouvrages avec un échantillon représentatif. Plus la population est importante, plus on a besoin d'un échantillon de grande taille. L'annexe II présente les principales notions statistiques liées à l'échantillonnage.

L'échantillon de la population est tiré à l'intérieur d'un pays. Généralement, le genre, l'âge et les groupes ethniques sont définis en fonction de leur représentation au niveau de la population étudiée. À titre d'exemple, pour l'enquête civile CAESAR, les femmes composent 53% de l'échantillon et les hommes 47%. La répartition des groupes ethniques peut affecter la distribution des caractéristiques anthropométriques de plusieurs variables (cf. chapitre 1). Le tableau 3.1, montre que la composition des Afro-américains est nettement plus importante pour l'enquête militaire ANSUR que pour l'enquête civile CAESAR et, inversement, les Caucasiens sont nettement plus représentés pour l'enquête CAESAR. Cela met en évidence l'importance pour les designers de choisir une base de données en fonction du groupe d'utilisateurs ciblés. Ainsi, dans la mesure du possible, il serait profitable de consulter des enquêtes réalisées auprès de groupes ethniques spécifiques, si leur représentation au niveau du marché ciblé est considérable.

⁹ Army Anthropometric Survey (Gordon, 1989)

Tableau 3.1 : Répartition au niveau ethnique, selon les populations étudiées

	Caucasien	Afro-américain	Amérindien	Hispanique	Asiatique	Autre
CAESAR (1998-2000)						
Femme	82,63%	13,05%	0,14%	0,47%	2,55%	1,15%
Homme	83,82%	11,18%	0,10%	1,04%	3,20%	0,65%
ANSUR (1988)						
Femme	51,60%	41,80%	0,60%	2,60%	1,40%	1,90%
Homme	66,10%	25,80%	0,70%	3,80%	1,60%	2,00%

Les données anthropométriques sont présentées en 1D, 2D et 3D. Qu'elles soient présentées en 1D dans les enquêtes ou en 2D dans les abaques, les mesures sont, dans les deux cas, prélevées en 1D. Contrairement aux enquêtes traditionnelles, les abaques ont la particularité de présenter les données en 2D et offrent des mannequins grossièrement définis avec différentes vues orthogonales (vu de face, de côté, du dessus) sur lesquelles sont illustrées les différentes mesures de segments. Certains logiciels de CAO et d'analyse ergonomique offrent également des représentations virtuelles 3D construites à partir de surfaces géométriques (cf. chapitre 5). Contrairement aux représentations obtenues à l'aide de scans, ces représentations sont construites à l'aide des données d'enquêtes. Comme nous le verrons à la section 3.4.1, les enquêtes n'offrant pas l'ensemble des mesures de segments, un grand nombre de variables anthropométriques offertes par les logiciels sont alors estimées. Le principal avantage des représentations 3D est la prise en considération de l'ensemble du volume occupé par des individus. Cet aspect vient combler la lacune associée aux enquêtes et aux abaques qui offrent un nombre limité de variables anthropométriques.

3.3.3 Les formats de présentation

Plusieurs formats de présentation sont offerts dans la littérature. Les plus communs sont les enquêtes, les abaques, les représentations balayées ainsi que les logiciels d'analyses ergonomiques et de CAO avec module anthropométrique.

3.3.3.1 Les enquêtes (données brutes)

Dans une enquête, les mesures sont présentées en 1D soit en pouces et en centimètres, sur une échelle centile dans des tableaux avec un dessin et/ou une photo identifiant la mesure. On présente d'abord des dessins généraux de face, d'arrière, de dessus, d'en bas, de gauche, de droite, accompagnés de cotes de mesure ainsi qu'un numéro correspondant à chacune des variables. Chaque mesure est identifiée par un nom, une description précisant la nature de la mesure ainsi qu'un code (ISO 7250; Forest et Leclerc, 1995). Généralement, la taille de l'échantillon, la moyenne, l'erreur type de la moyenne, l'écart-type, le coefficient de variation ainsi que la valeur minimale et maximale sont offerts pour chacune des variables anthropométriques.

Nos recherches sur Internet nous ont permis de trouver des études réalisées auprès d'individus très ciblés comme: i) les personnes âgées australiennes (Kothiyal et al., 1999) ; ii) les mesures de la tête de chinois pour la conception de masque respiratoire (Du, 2008) ; iii) d'étude chirurgicale sur l'anthropométrie de la tête et du visage qui compte 132 mesures relevées chez des jeunes enfants et adultes (Farkas et al., 1994) ; iv) les mesures de l'oreille externe pour le design d'écouteur (Liu, 2006) ; v) les zones d'atteinte et quelques mesures traditionnelles des personnes en fauteuil roulant (Das, 1999). Généralement, les mesures de ces études sont plus actuelles et surtout très détaillées, mais en contrepartie, les échantillons peuvent varier et certains sont très petits comme 33 individus (Kothiyal et al., 1999). Pour terminer, il existe également des enquêtes présentées sous formats électroniques, comme "PeopleSize 2008" qui permet de regrouper et traiter rapidement des données anthropométriques 1D de 9 pays différents.

3.3.3.2 Les abaques

En plus des postures debout neutre et assise, les représentations sont également offertes dans des postures contextualisées, ce qui facilite leur interprétation. La conduite automobile ainsi que le travail au poste avec terminal à écran de visualisation sont les contextes les plus traités. Dans l'ensemble, les abaques se caractérisent par les types d'informations offerts, c'est-à-dire des mesures anthropométriques linéaires en 1D, ou 2D, des amplitudes articulaires, des angles de vision, etc. Certains abaques s'adressent davantage aux ingénieurs,

d'autres aux architectes et designers d'intérieurs et d'autres, plus spécifiquement aux concepteurs de produits. Dans ce dernier domaine, les abaques les plus populaires sont : "The human scale" (Diffrient et al., 1981), "The measure of man and woman" (Tilley, 1993) et "Human Dimension & Interior space" (Panero et Zelnik, 1979). Nous présentons la description plus détaillée de ces abaques à la section 3.4.

Nos recherches nous ont permis de trouver également des abaques électroniques (Pogue et Associates Industrial Design en collaboration avec Henry Dreyfuss Associates) qui offrent des représentations 2D sous format électronique. Ces derniers peuvent être importés via les formats : AutoCAD, DWG and DXF files. Ces représentations possèdent des joints d'articulations et sont donc articulées. Quelques normes ISO proposent également des données parfois internationales (Jürgens et al., 1990). Les données présentées peuvent être contextualisées selon l'activité des différents types d'utilisateurs. Cependant, on y présente rarement un ensemble de données permettant aux concepteurs de créer des représentations fidèles d'un individu. Elles permettent, comme les enquêtes, d'établir des distances linéaires, parfois dans un plan bidimensionnel.

3.3.4 Les représentations digitales humaines (RDH) — Digital Human Modeling (DHM)

Pour terminer, en conception de produits, les simulations 3D avec représentations digitales humaines sont principalement utilisées dans les domaines comme l'aérospatiale, l'aéronautique, l'industrie militaire et de l'automobile ainsi que pour des analyses ergonomiques dans le domaine manufacturier (Chaffin, op.cit.).

On compte quatre grandes familles de logiciels possédant des plateformes différentes :

- i) les représentations humaines contenues dans les logiciels de CAO paramétriques, construites à partir de polyèdres de surface et des données d'enquêtes anthropométriques ;
- ii) les représentations basées sur les numérisations effectuées sur des humains ;
- iii) les représentations anatomiques, construites à partir de couches anatomiques successives (os, muscles, tendons, peau) ;
- vi) les représentations figuratives d'humains comme le logiciel POSER ou 3ds Max pour le cinéma et les jeux vidéo qui occupent une part importante dans le

développement. Cependant dans ce domaine, on recherche avant tout des morphologies plus réalistes plutôt que la précision au niveau de la mesure. Contrairement aux représentations offertes dans les logiciels de CAO, les segments de ces représentations ne sont pas construits à partir d'enquêtes anthropométriques, donc peu utiles pour dimensionner un objet. Compte tenu de l'importance de la CAO dans la conception de produits et de la piste prometteuse que peuvent représenter les simulations virtuelles, nous consacrons un chapitre entier à l'analyse des logiciels anthropométriques ou de CAO avec modules anthropométriques (cf. chapitre 5).

3.4 DESCRIPTION ET REVUE CRITIQUE DES OUTILS OFFERTS AUX DESIGNERS INDUSTRIELS

Compte tenu des délais associés à la recherche, nous nous sommes concentrés sur les ouvrages et outils recommandés et utilisés dans les institutions d'enseignement offrant les programmes de design industriel et/ou de génie mécanique. Par la suite, nous avons également sélectionné les plus importantes et récentes enquêtes civiles et militaires ainsi que les études auprès des enfants (cf. section 2.3). Nous présentons ici la description et une critique des différents ouvrages sélectionnés. Le tableau 3.2 synthétise les caractéristiques de ces ouvrages en termes de type, d'année, de coût, d'échantillon, de groupes d'âge, de nombre de variables, de types de mesures et de centiles disponibles.

Tableau 3.2 : Caractéristiques des récentes enquêtes, des abaques et logiciels avec module anthropométrique

	Nom	Année	Coût	Échantillon	Note	Groupes d'âge	Nombre de variables	Types de mesures	Centiles
Enquêtes	CAESAR / USA*	1998-2000	Complet 7 000\$ Sommaire 34\$	1 261 femmes 1 119 hommes		18 à 65	99	ID et circonférence	1 ^{er} à 3 ^e 5-10-20-25-50-75-80-90-95 ^e 97 à 99 ^e
	CAESAR / EUROPE			2000 individus					
	NHANES III	1988-94	Sommaire gratuit	33 994		2 mois et + 2 ans et + 4 ans et + 20 ans et + 60 ans et +	6 18 17 17 18	ID et circonférence	5-10-15-25-50-75-85-90-95 ^e
	ANSUR* Militaire (Gordon et al., 1989)	1987	Gratuite	2 208 femmes 1 774 hommes		18 à 51 17 à 51	240	ID et circonférence 132 mesures traditionnelles 60 sont obtenus de mesures dérivées 48 mesures de la tête	1 ^{er} à 3 ^e 5 à 95 ^e (à intervalle de 5) 97 à 99 ^e
	Anthropometry of infants, children and youths, for product safety (Snyder & al., 1977)	1977	Gratuite	2 035 filles 2 095 garçons		2 semaines à 18 ans	87	ID et circonférence 55 mesures du corps 16 mesures de la tête 16 mesures de la main	5, 50 et 95 ^e
	Strenght characteristics of U.S. children for product safety design (Owings & al., 1975)	1975	Gratuite	498 enfants		2.5 à 10.5 ans	47	14 / distances entre 2 articulations 33 / amplitudes articulaires	Valeur minium, Moyenne, 10 ^e , 90 ^e et Valeur maximum
Abaques	The human scale ; (Diffrient 1993)	N.D.	Non réédité	N.D. femme homme	Livret 1/2/3		21	Circonférence	2.5, 50 et 97.5 ^e
				N.D. garçon		Nouveau nés, .5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4	19	ID et circonférence	Moyenne
				N.D. femme homme				76 / ID pour les femmes 85 / ID pour les hommes 9 / distances entre 2 articulation 11 / amplitudes articulaire	2.5, 50 et 97.5 ^e
				N.D.	Planche 1a Planche 1b		23 23	ID distances entre 2 articulations amplitudes articulaire rayons	Selon la stature de 43'' à 78''
					Planche 2a Posture assise		16	ID Selon le type d'activité (Normal, secrétariat, "exécutive", salon, salle d'attente, théâtre, sofa, passager, voiture de course, sportive, familiale, commerciale, camion et équipement industriel)	homme large, homme moyen - femme large, adulte moyen, femme moyen - homme petit, femme petite
					Planche 2b Travail à une table		20	ID	Selon le niveau de scolarité Grade 1 à 12, l'âge 5 à 17 ans, femme petite, homme petit – femme moyenne – adulte moyen, homme moyen – homme large VS la stature moyenne de l'individu
					Planche 3a Personne en fauteuil roulant		25	ID	4-6, 6-9, 9-12 ans, femme petite, femme moyenne - homme petit, adulte moyen, homme moyen - femme large, homme large + une stature identifier pour chacun d'eux

Nom	Année	Coût	Échantillon	Note	Groupes d'âge	Nombre de variables	Types de mesures	Centiles
				Planche 3b Personnes âgées		28	ID	
				Planche 6a		31	Mesure de la tête Angle de vision	.5, 1 à 13 ans 1 ^{er} , 2.5, 5, 25, 50, 75, 95, 97.5, 99
				Planche 6b		25 7	Mesure de pied Et de la main	
				Livret 7/8/9		36 debout 22 conduite automobile	Amplitude articulaire	
				Planche 7a	Travail debout	36	ID Angles de vision et zone d'atteinte	6 à 16 ans femme petite, homme petit – femme moyenne, adulte moyen, homme moyen – femme large, homme large
				Planche 7b	Travail assis	41		
				Planche 8a		33	ID Espace à la maison	4-6, 6-9, 9-12, femme petite, homme petit – femme moyenne, homme moyen – femme large, homme large et Les mêmes catégories mais pour personne avec fauteuil roulant
				Planche 8b		38	ID Espace lieu public	Pour 1 personne, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000
				Planche 9a		60	ID Lien à la maintenance	Nu / Gants de travail / Vêtement d'hiver vs Homme large, Homme moyen – femme large
'The measure of man and woman; (Tilley, 1993)	N.D.	90\$	N.D. enfants sexe confondu		2 mois 3-5, 6-8, 9-11, 12-15, 16-19, 20-23	20	ID	Moyennes
					2.5-3, 4-17, 18-18.5		30 8 / distances entre 2 articulations 4 / rayons	Moyennes 5 ^e pour la stature femme 95 ^e pour la stature homme
			Militaires femmes hommes		20-65		64 / ID pour les femmes 63 / ID pour les hommes 12 / distances entre 2 articulations 4 / amplitudes articulaires 8 / rayons	1 ^{er} , 50 et 99 ^e Moyenne pour la dis. entre les yeux Épaisseur de l'abdomen pour 3, 6 et 8 mois de grossesse Point H, uniquement pour les hommes
						25	mesures de la tête (page 15)	1 ^{er} , moyenne et 99 ^e
					N.D.	9 joints	amplitudes articulaires : yeux, tête, épaule, coude, poignet, bassin, jambes, genoux et pieds	5 et 90 ^e
						31	mesures de la main ID et circonférences	1 ^{er} , 50 et 99 ^e
Human Dimension & Interior space ; (Panero & Zelnik, 1979)	1963	60\$	133 hommes		79 et plus	46	ID et circonférences	1 ^{er} -5-10-50-90-95-99 ^e
	1960		78 femmes		65-71	23	ID, diamètre prise en main	moyenne
	1960-62		N.D.		18-79 18-24, 25-34, 35-44, 45-54, 55-64, 65-74 et 75-79	12	ID	1 ^{er} , 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 ^e

	Nom	Année	Coût	Échantillon	Note	Groupes d'âge	Nombre de variables	Types de mesures	Centiles
				N.D. Femme et homme			7 6 5	ID 1D distance d'atteinte Liés au travail de maintenance homme	5 et 95°
		1963-65		Enfants		6, 7, 8, 9, 10 et 11 ans	10	Poids, stature et 8 mesures en position assis	5, 10, 25, 50, 75, 90, 95°
		1977		Militaires homme		N.D.	8 10	Mesures de la tête Mesures de la main 1D et circonférences	5 et 95°
							10 joints	amplitudes articulaires : tête, épaules, avant-bras, poignets, mains, bassin, jambes, genoux, chevilles et pieds	N.D.
Logiciels avec module anthropométrique	CATIA		42 000\$	Américaine Canadienne Française Japonaise Coréenne	N.D.	N.D.	103	circonférence, longueur, largeur, profondeur, stature et poids	entre 0,01 et 99,99 Pour la taille et le poids L'index, le préfixe, la moyenne, l'écart-type sont disponibles pour chacun des segments
	NX	1988	19 000\$	ANSUR	2 208 femmes 1 774 hommes	18 à 51 17 à 51	27	longueur, largeur, stature, poids	1, 5, 50, 95, 99 Attribuable indépendamment pour la taille et le poids
		N.D.		NHANES Année inconnu	N.D.	N.D.			
	ManneQuinElite	1988	5 000\$	ANSUR	2 208 femmes 1 774 hommes	18 à 51 17 à 51	12	largeur, longueur, épaisseur pour chacun des segments	2.5, 5, 50, 95, 97.5 Attribuable indépendamment pour la taille et le poids Différents types de morphologies "Body type" sont disponibles (mince, moyen, gros)
		N.D.		Grande- Bertagne Française Polonaise Suisse Japonaise Chine du sud Europe du nord NASA Std-300	N.D.	N.D.			
		1977		SAE, SP-450	Enfants	3 à 12 ans			

* Selon le rapport sommaire

Note : les cases blanches sont liées au fait que l'information n'était pas disponible ou n'a pas été trouvée.

3.4.1 Les grandes enquêtes

3.4.1.1 CAESAR

Civilian American and European Surface Anthropometry Resource Project—CAESAR™, estimé à 20 millions de dollars US, est la première enquête permettant d’offrir des représentations complètes en 1D et en 3D dans trois postures différentes (debout neutre, assis les mains sur les cuisses ainsi que les bras dans les airs avec le poing droit fermé et la main gauche ouverte). Les numérisations effectuées aux États-Unis et en Europe ont permis, à l’aide de repères installés sur les sujets (landmarks) avec des systèmes informatiques, d’obtenir 59 mesures toutes aussi précises que la méthode traditionnelle par palpation. Précisons cependant que 40 mesures, certaines traditionnelles et d’autres difficilement saisissables par balayage comme les circonférences, la masse et les mesures cachées sur les plis graisseux, ont été relevées par les méthodes traditionnelles (Robinette et al., 2005). Les designers peuvent se procurer le sommaire de l’étude qui offre les 99 mesures pour une somme de 34 \$ US. On offre plusieurs centiles frontières pour les femmes et les hommes âgés de 18 à 65 ans.

3.4.1.2 NHANES

Depuis 1956, la National Health Examination Survey (NHES), devenue aujourd’hui la National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) avec l’intégration de la nutrition comme déterminant sur l’état de santé, a mené 8 grandes enquêtes sur plusieurs années (annexe I).

Ces études sont orientées pour identifier les effets de certaines maladies et les incapacités des individus en général. Elles sont intéressantes dans la mesure où on y trouve des informations sur l’état de santé des individus comme la locomotion, des amplitudes articulaires, les performances visuelles, auditives et cognitives, etc. Ces informations peuvent être fort utiles lors de la conception de certains produits et tendent à considérer les handicaps dits normaux (c.f. chapitre 1). L’enquête NHANES III réalisée entre deux périodes 1988-1991 et 1991-1994, présente 18 mesures à partir d’un échantillon

d'Américains âgés de 2 mois et plus répartis dans 50 états. Le nombre de variables peut varier d'un groupe d'âge à l'autre. Contrairement à plusieurs enquêtes, NHANES III a le mérite de présenter les mesures par groupe d'âge : (de 3 à 5 mois, de 6 à 8 mois, de 9 à 11 mois, de 1 à 19 ans, puis par décennie de 20 à 79 ans et pour les individus de 80 ans et plus). Les données sont également présentées de façon courante, c'est-à-dire pour le groupe de 20 ans et plus. On présente également certaines mesures pour une catégorie 90 ans et plus. De plus, NHANES III présente les mesures en fonction des occupations des participants âgés de 17 ans et plus.

3.4.1.3 ANSUR

En ce qui concerne les enquêtes militaires, précisons que celles-ci peuvent provenir de l'armée de terre, de la marine, de l'air et même de la NASA. L'enquête militaire la plus imposante a été réalisée en 1987-88 (ANSUR). Cette dernière compte 240 variables : 132 mesures traditionnelles, 60 obtenues de mesures dérivées et 48 mesures de la tête. Les mesures traditionnelles ont été relevées par palpation alors que les mesures de la tête ont été prélevées en trois dimensions avec un dispositif appelé Automated Headboard Device (AHD). Les mesures de la tête ont été prélevées pour faciliter la conception des casques, des masques respiratoires, des lunettes et autres équipements de protection. Le coût élevé de ces études oblige à réduire le nombre de mesures. Les 60 mesures dérivées sont donc moins fiables que les 132 premières mesures directement relevées sur les sujets.

3.4.1.4 Les enquêtes pour enfants

Les enquêtes réalisées auprès des enfants datent également des années 80 (annexe I). Les variables ainsi que les échantillons de participants sont également moins nombreux que ceux des adultes. On y présente sensiblement les mêmes mesures que chez les adultes. Owings et al. (1975) ont relevé plus spécifiquement les limites articulaires du poignet, du coude, de l'épaule, de la cheville, du genou, de la hanche, du tronc et les distances entre ces différents joints d'articulations.

3.4.1.5 Synthèse critique des enquêtes

Les enquêtes récentes sont chères, le coût à l'origine pour les données de CASAR se situait autour de 20 000 dollars. Le sommaire, de la même enquête, moins coûteux se limite à ne présenter qu'un nombre limité de mesures et d'information. Comme le mentionne Ferreira (2004), les enquêtes tardent à être disponibles pour le grand public. L'intérêt de l'enquête CAESAR est d'avoir balayé près de 4 400 civils américains et européens de 18 à 65 ans qui possèdent des morphologies différentes, des militaires jeunes, bien entraînés et en excellente condition physique. D'ailleurs, les enquêtes CASEAR et NHANES III sont complémentaires, même si les deux enquêtes ne couvrent pas la même fourchette d'âge et malgré que NHANES III n'offre que 17 variables, elle présente cependant des paramètres biométriques relatifs à certaines maladies et incapacités des individus en général. Concernant ANSUR, avant d'établir un quelconque constat sur son utilité, nous évaluerons la mesure de quelques segments dans le temps (cf. chapitre 4).

Les variables mesurées sont liées aux intérêts et besoins des bailleurs de fonds associés à l'enquête. Par exemple, les principaux partenaires pour l'enquête CAESAR sont entre autres The Boeing Company, Ford Motor Company, General Motors, Mitsubishi Motors Corporation, Nissan Motor CO., Ltd., Transport Canada, ainsi que plusieurs compagnies oeuvrant dans le domaine vestimentaire comme Levi Strauss & Company, Sears Manufacturing Company. On comprend plus aisément, l'intérêt de CAESAR pour les dimensions de vêtements ainsi que le modèle de voiture des participants. Les données relatives aux enfants ne font pas exception. À titre d'exemple, la conception et l'intérêt pour la sécurité de produits spécifiques comme les sièges d'appoint pour enfants, ont amené la réalisation d'enquêtes anthropométriques chez les enfants (Schneider et al., 1985; Snyder et al., 1977; Owings et al., 1975; Snyder et al., 1975).

3.4.2 Les abaques les plus utilisés au Québec

3.4.2.1 The human scale (Diffrient et al., 1981)

Réalisé en collaboration avec Henry Dreyfuss Associates, cet abaque a la particularité d'être regroupé dans trois pochettes contenant chacune une brochure et trois cartes plastifiées

avec une roulette amovible qui permet de visualiser l'ensemble des mesures de segments lorsqu'on sélectionne un centile en particulier (Fig 3.6).

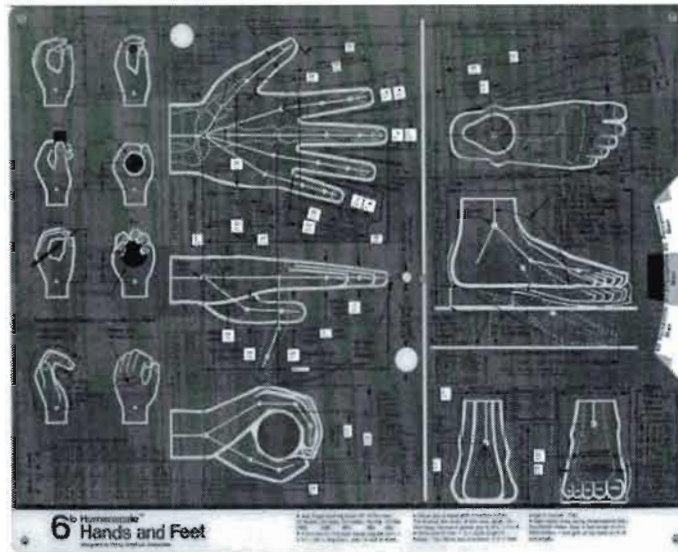


Figure 3.6 : Cartes plastifiées de l'abaque. (Diffrient et al., 1981.)

Diffrient (1981) présente une panoplie de données : mesures conventionnelles debout et assis, circonférences, centres de gravité, poids pour les principaux membres, mesures de la tête, angles de visions, mesures de la main et du pied. On retrouve certaines mesures pour enfant ainsi que des corrections pour la présence de vêtements de ville et d'hiver pour les civils, hommes et femmes ainsi que des tenues militaires lourdes et plus légères pour hommes. Ces données sont utiles car les enquêtes ne prennent pas en considération la mesure avec les vêtements. Parmi les points forts de cet abaque, soulignons la présence de plusieurs mesures contextualisées dans des situations telles la conduite de véhicule automobile, le travail sur un pupitre, des mesures de préhension et d'occupation du volume pour le travail avec écran de visualisation fixe, en position debout et assise. The human scale présente aussi des données 1D et des zones d'atteinte de personnes avec fauteuil roulant ainsi que des personnes âgées de 65-79. D'autres planches traitent davantage de la force, de la sécurité, des activités liées à la maintenance ainsi qu'à l'architecture résidentielle et commerciale. Une autre traite des aspects d'éclairage et ceux liés à l'environnement (bruit, température, vibration, etc). Une section de l'abaque traite du design pour tous, en fonction de la variation

d'âge, mais avec des données du 50e centile. Ces représentations sont très risquées sachant que "l'Homme moyen" n'existe pas (Daniels, 1952). Les centiles offerts varient d'une planche à l'autre, généralement les 2.5, 50 et 97.5e centiles sont offerts. Cela met en évidence que cet abaque traite de plusieurs aspects qui sont liés à l'anthropométrie comme la capacité pour un individu de détecter et d'actionner une commande selon sa morphologie, le volume qu'il occupe en fonction d'une posture précise. Pour terminer, on compte également des mesures biomécaniques c'est-à-dire des distances entre des points de pivot. Ces mesures permettent aux concepteurs de se construire des représentations articulées.

3.4.2.2 The measure of man and woman (Tilley, 1993)

Cet ouvrage, réalisé en collaboration avec Henry Dreyfuss Associates, présente des tableaux et planches similaires à l'abaque "The human scale" de Diffrient et al., (1981) (Fig 3.7). À la différence de l'abaque de Diffrient, Tilley n'offre pas de planches pour les circonférences, le centre de gravité et les poids pour les principaux membres, ni de planche portant sur la conduite de véhicules industriels ainsi que des forces liées à différentes tâches/activités. Soulignons également qu'en général "The measure of man and woman" présente moins de mesures au niveau de l'ensemble des segments, dont 63 pour les hommes et 64 pour les femmes, contrairement à 85 pour les hommes et 76 pour les femmes pour l'abaque de "Human scale". Les sources des mesures sont d'origine militaire et le 1er, 50e et 99e centile sont principalement offerts. Ajoutons que la personne âgée du 99e centile contrairement à celle "The human scale", présente une obésité androïde, c'est-à-dire abdominale. Cela met en évidence que certaines caractéristiques morphologies ne sont pas prises en considération entre les représentations d'un même ouvrage et d'un ouvrage à l'autre.

aux architectes et designers d'intérieur. "Human Dimension & Interior space" donne la source de la majorité des données parfois militaires, parfois civiles. Les centiles offerts sont le 5e, 50e et 95e.

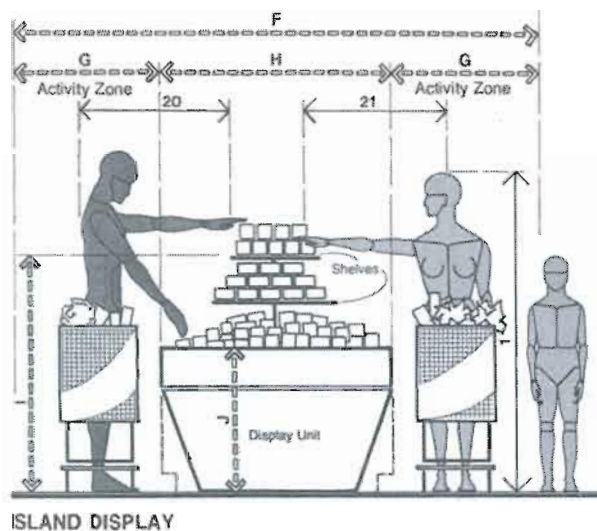


Figure 3.8 : Planche de l'abaque. (Panero et Zelnik, 1977)

3.4.2.4 Synthèse critique des abaques

Les abaques offrent un ensemble de données qui semblent mieux répondre à l'activité de conception d'objets, car elles sont contextualisées et leur format 2D s'adapte aux formats des esquisses élaborées au début de la conception. Cependant, le tableau 3.2, met en évidence que les ouvrages tirent leurs sources d'enquêtes qui datent, ce qui laisse supposer que les données qu'elles contiennent ont certainement connu des évolutions (Cavelaars et al., 2000; Ogden et al., 2004; Robinet et al., 2007; Roe, 1993). Contrairement au deux autres abaques, "The human scale" ne précise pas la source des différentes mesures. Il est alors impossible pour le concepteur de savoir si celles-ci sont militaires ou civiles. Le tableau 3.2 met en lumière d'autres constats ; i) les mesures de la tête, de la main et du pied offertes dans les abaques proviennent davantage de sources militaires que civiles ; ii) l'absence de données dynamiques obligerait les concepteurs à favoriser d'autres méthodes (maquettes et prototypes) pour dimensionner les produits sportifs ou outils manuels ; iii) il est

manifestement plus facile de trouver des mesures contextualisées pour la conduite automobile et le travail de bureautique, que tout autre contexte. Selon la nature de l'objet à dimensionner, le concepteur aura plus ou moins de difficulté à trouver des mesures spécifiques.

En observant les représentations des abaques, on constate l'absence de représentation avec des mesures atypiques. Il n'est pas possible pour un concepteur d'utiliser des représentations prêtes à l'utilisation et possédants des petites jambes et un long tronc et/ou souffrants d'une obésité abdominale. Cela met en évidence, qu'il est plus difficile pour le concepteur de simuler ou de prendre en considération un ensemble d'individus présentant des morphologies différentes. De plus, contrairement aux enquêtes, les abaques n'offrent pas les données comme l'écart type et la moyenne permettant aux designers d'identifier le ou les centiles accommodés tout au long du processus de conception. Sachant que la dimension "opportuniste"¹⁰ du processus de conception (Falzon, 1995; Dareses 1994; Visser 1990; Vezeau 2004) suppose qu'à tout moment, le designer peut avoir besoin de données spécifiques, les limites des informations offertes dans les abaques compliquent le travail des concepteurs. La faible variété de centiles offerts limite les possibilités de bien dimensionner un produit, notamment la possibilité d'évaluer à quel centile le projet répond. Cela met en évidence que les designers industriels travaillant dans des studios de design et collaborant le plus souvent sur différents types de produits doivent posséder plusieurs ouvrages anthropométriques afin d'optimiser la prise en compte de différentes mesures frontières. Précisons que l'abaque "Human Dimension & Interior space" n'offre pas le 50e centile pour certaines mesures. Cela peut représenter une difficulté pour les designers, car les centres des plages d'ajustement se calculent à partir des centiles frontières et du 50e centile.

¹⁰ L'élaboration de solutions liées à la conception du produit est réalisée en fonction des possibilités ouvertes, elle ne s'appuie pas sur un plan d'action prévu. Bien au contraire, elle inscrit dans des boucles "conception-validation-optimisation".

3.4.3 Les représentations 3D

3.4.3.1 Les logiciels conçus à partir de numérisation d'humain

Les individus balayés représentent un portrait plus fidèle de la réalité des gens pour lesquels les designers industriels conçoivent les produits (Fig 3.9). Cependant, la qualité des représentations laisse à désirer, surtout au niveau des mains, dû aux mouvements des participants lors du balayage. Plusieurs efforts ont toutefois permis d'obtenir des modèles fermés (Ben Azouz et al., 2005). Les efforts se poursuivent également pour en arriver à des représentations articulées et utilisables pour aider les concepteurs à dimensionner les produits ou systèmes (Ben Azouz et al., 2004; Allen et al., 2003; Allen et al., 2004; Viktor et al., 2005; Viktor et al., 2006).

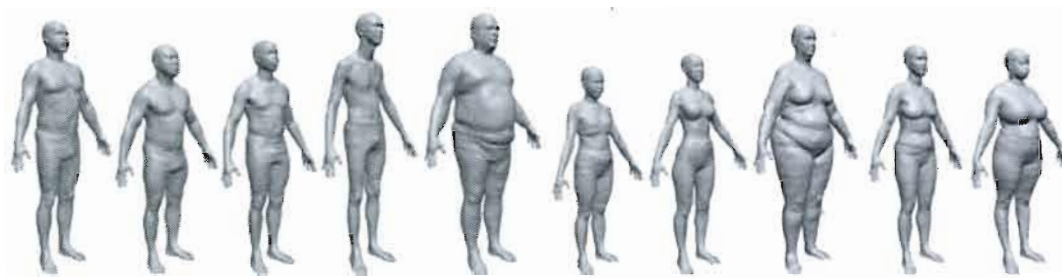


Figure 3.9 : Scans 3D, enquête CAESAR

Les numérisations offrent un avantage sur la 1D et 2D, car ils donnent la possibilité d'extraire des mesures précises à l'aide de coupes réalisées dans le mode 3D. Présentement, les numérisations d'êtres humains font l'objet d'un grand intérêt et plusieurs efforts sont réalisés pour créer des logiciels ou produits d'aide au dimensionnement de vêtements et de produits. CLEOPATRA, logiciel développé par le conseil national de recherche du Canada (CNRC) est le complément parfait de CAESAR. CLEOPATRA est un système unique d'exploration de données anthropométriques ayant la capacité d'extraire les individus semblables et de regrouper la population en fonction des formes tridimensionnelles et des mesures anthropométriques. Cet outil offre donc la possibilité de choisir des représentations d'humains selon un groupe de population en particulier, ce qui optimise la validation lors de la conception (Ben Azouz et al., 2002).

3.4.3.2 Les logiciels d'analyse ergonomique et de CAO avec module anthropométrique

Ces représentations sont paramétriques, articulées et construites à partir de surfaces polyèdres, apparaissant comme une série de surfaces plates. Ils ont surtout l'avantage d'incorporer les représentations dans l'environnement natif de CAO. Les logiciels les plus populaires sont CATIA de Dassault système, NX de Siemens et ManneQuinElite de Nexgen. Le nombre de variables et de centiles offerts varient d'un logiciel à l'autre. Le prix des modules anthropométriques peut être élevé, près d'une quarantaine de milliers de dollars, ce qui limite leur accès pour des petits studios de design. Compte tenu de l'importance de la CAO dans la conception de produit, nous consacrons un chapitre entier sur l'analyse des logiciels anthropométriques ou de CAO avec module anthropométrique (cf. chapitre 5).

3.5 SYNTHÈSE

La fascination pour les proportions du corps humain remonte à des temps anciens. Cependant, nos recherches mettent en évidence une origine parallèle, c'est-à-dire qu'elle tire à la fois leur origine d'un passé séculaire en lien avec le domaine militaire et l'anthropométrie judiciaire. Le format des abaques colle davantage au matériel de Bertillonage. De nouvelles technologies comme la numérisation d'humains permettent d'offrir des représentations plus réelles et très variables sur le plan morphologique. Les outils les plus communs sont les enquêtes, les abaques et les logiciels avec module anthropométrique. Comparativement aux représentations digitales humaines, les abaques ne permettent pas la prise en compte du volume occupé par les individus dans un plan tridimensionnel. Elles permettent d'établir les dimensions uniquement en fonction de deux plans (2D), obligeant les designers à travailler avec plusieurs vues pour tenir compte de la troisième dimension. Cependant, le format des abaques est compatible avec les esquisses également en 2D et réalisées par les designers industriels en début de projet. Contrairement aux mesures 1D des enquêtes, les données contextualisées sont en meilleure adéquation avec l'activité des designers industriels. Cependant, les contextes étudiés se limitent au travail de bureau et à la conduite de véhicule. L'offre ne présentant pas une cohérence au niveau du format de présentation, du nombre de variables et des centiles offerts, cela peut compliquer l'activité de dimensionnement conduite par les designers industriels. La majorité des abaques

étudiés date et tire leurs sources d'enquêtes militaires. La majorité des ouvrages et outils ne présente pas les données en fonction de groupes d'âge ou d'autres facteurs de variations, ce qui limite la possibilité pour les concepteurs de prendre en compte des caractéristiques appartenant à un marché cible. De plus, la grande variabilité de la nature des informations offertes oblige les concepteurs à posséder plusieurs ouvrages et enquêtes. Pour terminer, les centiles frontières ne permettent pas la prise en compte de représentations avec des mesures variables, c'est-à-dire avec des mesures atypiques.

Cette offre ne peut être complète sans avoir au préalable analysé les logiciels avec module anthropométrique. Les outils de CAO tendent à occuper une place de plus en plus importante, d'où l'intérêt d'étudier les modules anthropométriques des logiciels utilisés (cf. chapitre 5). De plus, on a vu que les critères de cueillette des mesures pouvaient varier d'une enquête à l'autre. Or, dans quelles mesures affectent-elles la cohérence des mesures sur lesquelles se basent les designers industriels pour dimensionner ? Une analyse exhaustive s'impose.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES UTILISÉES PAR LES DESIGNERS INDUSTRIELS

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la cohérence des ouvrages anthropométriques susceptibles d'être utilisés par les designers industriels lors de l'activité du dimensionnement. Il présente les résultats de trois comparaisons des données anthropométriques de 19 segments identiques d'hommes et de femmes présentés dans différentes enquêtes. La première présente les résultats de la comparaison de deux enquêtes civiles (CAESAR 1998-2000 — NHES I 1960-62) et deux enquêtes militaires (ANSUR 1988 — US Army Men 1946) réalisées à des intervalles de 42 ans. La seconde présente les écarts entre les résultats d'une étude civile (CAESAR 1998-2000) et d'une étude militaire (ANSUR 1988). La troisième présente les résultats de la comparaison des mesures des segments de 3 abaques avec l'enquête CAESAR (1998-2000). Pour terminer, nous présentons quelques incohérences associées à la manipulation des données.

4.1 COMPARAISON DES DONNÉES ANTHROPOMETRIQUES UTILISÉES

D'un point de vue statistique, on constate que les populations changent au niveau morphologique et que l'indice de masse corporelle des Nord-Américains augmente chaque année. Selon Statistique Canada (2006), entre 1978-79 et 2004, la prévalence de l'obésité a augmenté pour chaque groupe d'âge, à l'exception de celui des 65 à 74 ans. La plus forte augmentation est observée chez les individus de 25 à 34 ans, passant de 8,5% à 20,5%. La question qui se pose alors est dans quelle mesure les données anthropométriques reflètent ces transformations observées au fil du temps et dans quelle mesure les différentes sources sont-elles cohérentes les unes par rapport aux autres ?

4.1.1 Comparaison entre deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires présentant un intervalle de 42 ans

Pour peindre un portrait plus juste des transformations morphologiques des Nord-Américains, nous avons comparé les données issues de deux enquêtes civiles et de deux enquêtes militaires. L'analyse effectuée avec les données des hommes sur un intervalle de 42 ans entre deux enquêtes civiles (CAESAR, 1998-2000 ; NHES, 1960-62) et deux enquêtes militaires (ASUR, 1988 ; U.S. Army Men 1946), montre des écarts importants au niveau du 95e centile homme (Tab. 4.1).

Tableau 4.1 : L'évolution morphologique selon la provenance de la population — Comparaison entre les variables anthropométriques de deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires pour les hommes

Hommes 5e, 50e et 95e centile	Écarts entre			Écarts entre		
	CAESAR 1998-2000			ANSUR 1988		
	NHES 1960-62			U.S. Army Men 1946		
	5	50	95	5	50	95
Mesures sont en mm						
Posture debout						
Poids (Kg)	6	4	16	5	8	11
Stature	35	24	52	14	15	23
Circonférence de la tête				2	2	1
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs						
Largeur des épaules	24	31	52	33	36	37
Circonférence de la poitrine	13	17	69	50	68	84
Circonférence de l'abdomen	24	-12	24			
Circonférence des hanches				40	54	61
Largeur des hanches						
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)						
Hauteur de la jambe	-43	-43	-37	2	2	7
Posture assis						
Hauteur du buste (hauteur assise)	13	12	20	4	5	7
Hauteur des yeux	10	6	16			
Longueur du bras				12	6	3
Longueur de l'avant-bras				9	8	13
Largeur au bassin	19	16	32	6	12	18
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)						
Longueur de la cuisse (fesses- genou)	21	18	33	23	21	27
Hauteur de la jambe (genou-sol)	22	13	12	11	9	9

Les civiles du 5, 50 et 95e centile ont grandi, respectivement de 35, 24 et 52 mm. On note par le fait même une augmentation, davantage marquée pour le 95e centile, de la hauteur du buste (20 mm) et de la hauteur des yeux en position assise (16 mm). Curieusement, on remarque une diminution marquée de la longueur des jambes pour le 5, 50 et 95e, alors que chez les militaires entre 1946 et 1988, ce segment a peu évolué. Les hommes civils ont également pris du poids, 16 kg (35.3 lbs) pour le 95e centile. Cette surcharge pondérale peut

être associée à l'augmentation significative des circonférences de la poitrine et l'abdomen chez les civils, soit 69 mm et 24 mm (95e centile). L'augmentation de la largeur du bassin assis (32 mm) et de la longueur de la cuisse, des fesses au genou (33 mm), laisse croire également à une augmentation de la masse adipeuse au niveau du fessier. De plus, on constate que la largeur des épaules a augmenté considérablement pour le 95e centile soit 52mm. Les militaires entre 1946 et 1988 ont grandi et pris également du poids. On remarque une augmentation significative au niveau de la circonférence de la poitrine et des hanches, une augmentation au niveau de la largeur des épaules et de la longueur de la cuisse, cependant rien ne nous permet d'identifier que l'augmentation de ce volume est musculaire ou adipeuse.

Chez la femme, les changements ne s'opèrent pas de la même façon (Tab. 4.2). Les femmes civiles ont également grandi, soit respectivement 27, 32 et 63 mm (5, 50 et 95e centile). On constate que les femmes civiles, surtout le 95e centile, ont davantage grossi. Toujours chez les 95e, on observe une augmentation significative des circonférences de la poitrine (179 mm), de l'abdomen (72 mm), de la largeur du bassin (67 mm) et la longueur de la cuisse (23 mm). Ces variables sont toutes associées au phénomène de l'obésité et contribuent à modifier le volume occupé par un individu. Tout comme chez les hommes, la largeur des épaules a augmenté en moyenne chez les deux populations. Chez les militaires, on note une augmentation de la circonférence de la poitrine et des hanches debout. Cependant, on observe une diminution de ces deux variables pour le 95e centile, alors que la largeur des hanches a légèrement diminué pour l'ensemble des centiles sélectionnés. On observe également une augmentation au niveau de la hauteur des jambes debout. La longueur de la cuisse et la hauteur des genoux en position assise a aussi augmenté significativement. Pour terminer, on observe également une augmentation de la longueur de l'avant-bras (longueur du coude au bout du doigt). Sur le plan du design de produit, cette variable tout comme la longueur du bras, sont importantes, car elles influencent la distance de la préhension des organes de commande.

Tableau 4.2 : L'évolution morphologique selon la provenance de la population — Comparaison entre les variables anthropométriques de deux enquêtes civiles et deux enquêtes militaires pour les femmes

Femmes 5e, 50e et 95e centile	Écarts entre			Écarts entre		
	CAESAR 1998-2000			ANSUR 1988		
	NHES 1960-62			U.S. Army Men 1946		
Mesures sont en mm	5	50	95	5	50	95
Posture debout						
Poids (Kg)	2	4	13	2	3	0
Stature	27	32	63	4	7	15
Circonférence de la tête				-4	-5	-8
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs						
Largeur des épaules	19	27	46	39	38	30
Circonférence de la poitrine	42	58	179	32	22	-11
Circonférence de l'abdomen	22	20	72			
Circonférence des hanches				18	21	-3
Largeur des hanches				-8	-7	-7
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)						
Hauteur de la jambe	-9	0	18	38	42	50
Posture assis						
Hauteur du buste (hauteur assise)	24	13	18	11	14	21
Hauteur des yeux	5	8	23			
Longueur du bras				6	3	3
Longueur de l'avant-bras				17	18	26
Largeur au bassin	36	40	67	16	16	12
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)						
Longueur de la cuisse (fesses- genou)	15	15	23	22	20	23
Hauteur de la jambe (genou-sol)	11	8	9	37	37	44

4.1.2 Comparaison entre deux enquêtes, l'une civile et l'autre militaire

Plusieurs abaques et logiciels anthropométriques tirent leurs mesures d'enquêtes militaires. Or, en comparant les données de deux grandes enquêtes, l'une civile (CAESAR, 1998-2000) et l'autre militaire (ASUR, 1988), on remarque plusieurs écarts entre les dimensions corporelles des civils et des militaires (Tab. 4.3 et 4.4)

Tableau 4.3 : Écarts morphologiques selon la provenance de la population — Comparaison entre une enquête civile et une enquête militaire pour l'homme

Hommes 5e, 50e et 95e centile	Écarts entre		
	CAESAR 1998-2000		
	ANSUR 1988		
Mesures sont en mm	5	50	95
Posture debout			
Poids (Kg)	2	2	17
Stature	3	4	34
Circonférence de la tête	8	9	11
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs	6	4	11
Largeur des épaules	-10	-5	16
Circonférence de la poitrine	-1	21	97
Circonférence de l'abdomen	13	16	98
Circonférence des hanches	32	37	104
Largeur des hanches			
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)			
Hauteur de la jambe	-46	-39	-36
Posture assis			
Hauteur du buste (hauteur assise)	2	5	13
Hauteur des yeux	4	8	19
Longueur du bras			
Longueur de l'avant-bras			
Largeur au bassin	0	7	24
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)			
Longueur de la cuisse (fesses-genou)	-7	-5	6
Hauteur de la jambe (genou-sol)	-2	-2	1

Tableau 4.4 : Écarts morphologiques selon la provenance de la population — Comparaison entre une enquête civile et une enquête militaire, pour la femme

Femmes 5e, 50e et 95e centile	Écarts entre		
	CAESAR 1998-2000		
	ANSUR 1988		
Mesures sont en mm	5	50	95
Posture debout			
Poids (Kg)	0	5	26
Stature	-2	2	30
Circonférence de la tête	3	5	10
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs	3	2	9
Largeur des épaules	-12	-6	21
Circonférence de la poitrine	0	31	185
Circonférence de l'abdomen	-42	-19	119
Circonférence des hanches	39	69	236
Largeur des hanches			
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)			
Hauteur de la jambe	-28	-26	-15
Posture assis			
Hauteur du buste (hauteur assise)	14	10	15
Hauteur des yeux	16	14	17
Longueur du bras			
Longueur de l'avant-bras			
Largeur au bassin	6	21	69
Bi-Trochanteric (distance maximale du massif fessier)			
Longueur de la cuisse (fesses-genou)	-9	-4	8
Hauteur de la jambe (genou-sol)	-8	-9	-5

Selon la comparaison, les civils du 95e centile sont plus lourds et plus grands que les militaires de cette époque soit un écart de 17 kg (37.4 lbs) pour le poids et de 34 mm pour la stature du 95e centile. En accord avec Stoudt (1979), on peut croire que les militaires d'aujourd'hui ont également grandi et sont plus grand que les civils. On observe également que les militaires de cette époque ont des plus longues jambes que les civils d'aujourd'hui.

On peut expliquer cet écart par la présence de critères physiques lors de la sélection des candidats. Une augmentation de la hauteur du buste et de la hauteur des yeux en position assise traduit bien que les civils ont grandi. Toujours chez les civils, c'est au niveau des circonférences de la poitrine, de l'abdomen et des hanches que l'on note les plus gros écarts, respectivement 97, 98 et 104 mm (95e centiles). La largeur des épaules est plus large pour le 95e, alors qu'elle est légèrement plus petite pour le 5e et 50e centile.

Chez la femme, on constate que le poids et la taille des 95e centiles présentent également d'importants écarts (Tab. 4.4). Les circonférences de la poitrine, de l'abdomen et spécifiquement des hanches sont nettement plus grandes chez la femme civil, soit 185, 119 et 236 mm. On note une moins grande augmentation de la longueur fesses-genou. Cependant, on remarque une augmentation de la largeur des hanches assis pour les 50e et 95e centiles civils. Certains écarts sont considérables et peuvent amener les designers à établir des dimensions incohérentes pouvant générer des inconforts, voire même exclure un grand nombre d'individus. À titre d'exemple, l'utilisation de la largeur du bassin assis, pour le 95e centile femme, de l'enquête ANSUR (432 mm) plutôt que celle de CAESAR (501 mm) pour déterminer la largeur d'un siège d'avion peut générer des inconforts ou exclure près de 25% de femmes et 5% des hommes civils plus corpulents (cf. section 4.2).

4.1.3 Comparaison entre les données de CAESAR et trois abaques

Nous avons comparé les données de l'enquête civile CAESAR et les données des abaques les plus diffusées dans les universités dispensant des programmes liés à la conception de nouveaux produits : l'UQAM (l'École de design), l'Université de Montréal (l'École de design industriel) et l'École Polytechnique de Montréal (Génie mécanique). Rappelons que pour l'ouvrage de Tilley (1993), "The measure of man and woman", nous présentons les écarts pour le 1er, 50e et 99e centile. (Tab. 4.5).

Tableau 4.5 : Écarts morphologiques selon la provenance des abaques, outils privilégiés par les designers industriels

Comparaison entre l'enquête CAESAR et trois abaques, pour les hommes

Hommes 5e, 50e et 95e centile	Abaques								
	The mesure of man and woman			Humanscale			Human dimension & interior space		
	Trilley			Diffrient & al.			Panero & Zelnik		
	1	50	99	5	50	95	5	50	95
Mesures sont en mm									
Posture debout									
Poids (Kg)	11	1	30	-6	2	29	6	4	18
Stature	16	4	45	14	11	42	35	24	52
Circonférence de la tête					12		-1		5
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs							2		4
Largeur des épaules	20	21	69	29	36	65	-2		24
Circonférence de la poitrine					25				
Circonférence de l'abdomen					3				
Circonférence des hanches					40				
Largeur des hanches									
Hauteur de la jambe	-57	-32	9	-38	-32	-1	38		-39
Posture assis									
Hauteur du buste (hauteur assise)	-4	5	19	13	10	25	13	12	20
Hauteur des yeux	-13		17	-3	3	24	-23		6
Longueur du bras									
Longueur de l'avant-bras									
Largeur au bassin	20	11	54	11	19	41	19	16	31
Longueur de la cuisse (fesses-genou)	16	11	35	3	16	30	21	18	33
Hauteur de la jambe (genou-sol)	11	5	14	5	7	18	23	12	13

Selon l'abaque utilisé, les écarts peuvent être plus ou moins considérables, mais ils le sont davantage pour les centiles frontières du 99e et 95e centile. On observe, au niveau des trois abaques des écarts notables variant entre 30 à 18 kg pour le poids et 42 à 52 mm pour la stature. Les écarts pour la largeur des épaules sont également grands pour les mesures frontières des trois abaques (69, 65 et 24 mm). On peut également observer d'importants écarts au niveau de la largeur du bassin entre 31 et 54 mm et la longueur de la cuisse entre 31 et 54 pour les mesures frontières. La hauteur de la jambe tout comme pour la précédente comparaison est plus petite pour les données de l'enquête CAESAR. Ces derniers écarts laissent croire que les origines des données des abaques sont d'origines militaires.

Au niveau des femmes, le tableau 4.6 montre également qu'il y a d'importants écarts. Tout comme chez les hommes, on observe des écarts marqués variant, entre 42 à 18 kg pour le poids et entre 47 à 63 mm pour la stature des valeurs frontières supérieures. Les plus grands écarts sont observés au niveau de la largeur des épaules entre 48 et 97 mm, du bassin assis entre 59 et 93 mm et de la longueur de la cuisse entre 23 et 59 mm. La largeur du bassin présente des écarts pour l'ensemble des mesures des abaques, allant de 32 à 93 mm. Les valeurs fournies par CAESAR sont majoritairement plus grandes ; cependant, certaines sont plus petites. Par exemple, pour le 50e de "Human scale" les circonférences de la poitrine (-26 mm), la hauteur du buste (-20 mm) et (-42 mm) toujours pour la hauteur du buste, mais pour le 99e centile de l'abaque "The measure of man and woman". Cela met en évidence, que parfois les concepteurs pourraient être amenés à surdimensionner certains produits.

Tableau 4.6 : Écarts morphologiques selon la provenance des abaques, outils privilégiés par les designers industriels

Comparaison entre l'enquête CAESAR et trois abaques, pour les femmes

Femmes 5e, 50e et 95e centile	Abaques								
	The mesure of man and woman			Humanscale			Human dimension & interior space		
	Trilley			Diffrient & al.			Panero & Zelnik		
	1	50	99	5	50	95	5	50	95
Mesures sont en mm									
Posture debout									
Poids (Kg)	2	3	42	-12	0	33	2	4	13
Stature	15	4	51	15	15	47	27	32	63
Circonférence de la tête					2				
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs							3		-1
Largeur des épaules	30	17	97	17	20	48	7		61
Circonférence de la poitrine					-26				
Circonférence de l'abdomen					20				
Circonférence des hanches					26				
Largeur des hanches									
Hauteur de la jambe	-40	-13	23	-24	-3	18	-9		18
Posture assis									
Hauteur du buste (hauteur assise)	1	2	-42	22	-20	28	24	13	18
Hauteur des yeux	7		5	15	14	24	-13		6
Longueur du bras									
Longueur de l'avant-bras									
Largeur au bassin	46	32	93	33	32	59	36	40	67
Longueur de la cuisse (fesses-genou)	4	10	48	17	18	59	15	15	23
Hauteur de la jambe (genou-sol)	11	1	16	1	3	12	11	8	10

Les comparaisons mettent en évidence que l'offre ne reflète pas les transformations observées au fil du temps. Les différents ouvrages ne sont pas cohérents car ils datent et/ou sont issus de populations très différentes. Nos recherches mettent également en évidence qu'il existe des incohérences au niveau des manipulations des bases de données.

4.2 INCOHÉRENCES LIÉES AUX MANIPULATIONS DES DONNÉES

La revue de littérature et des manipulations que nous avons réalisées mettent en évidence un lien entre certains formats de présentation offerts et les fausses interprétations, ici appelées pièges : i) "l'Homme moyen" ; ii) l'existence de représentations possédant des mesures uniformes, de même centile ; iii) l'addition ou la soustraction de segments pour déterminer une mesure non disponible; iv) l'utilisation du 5e centile femme et 95e centile homme pour obtenir les "extrêmes" ; v) et l'établissement du pourcentage d'exclusion en fonction des représentations frontières offertes en 2D. Nous souhaitons d'abord faire la lumière sur certains principes pour éviter des erreurs d'interprétation qui pourraient mener à de mauvais dimensionnements.

Piège 1 : Le 50e centile ou l'homme moyen

Depuis longtemps, Daniel (1952) a démontré que "l'Homme moyen" n'existe pas. Généralement et surtout en design industriel, le 50e centile est très souvent considéré comme une représentation moyenne. Un centile n'est pas un pourcentage. Si le designer souhaite satisfaire 50% d'une population, il faut plutôt couvrir 25% de la population de part et d'autre du 50e centile. Alors pour une même mesure, il faudra considérer la mesure du 25e et 75e centile.

Piège 2 : Des individus possédant des mesures uniformes

Au même titre que "l'Homme moyen", les représentations 2D offertes par les abaques ne sont pas des représentations d'individus réels. En effet, la probabilité de trouver un individu dans le monde dont l'ensemble des segments serait du même centile est nulle. Ces représentations ont été conçues dans l'unique but de prendre en considération les justes mesures frontières inférieures (1er, 2.5 ou 5e centile) et supérieures (95e, 97.5e ou 99e) acceptables pour satisfaire le plus grand nombre. D'ailleurs, Dainoff et al, (2004) et Zehner (1996) mettent en évidence les limites associées à l'utilisation des centiles frontières (voir piège 5).

Piège 3 : L'addition ou la soustraction de segments pour déterminer une mesure non disponible

Par l'absence de certaines données, les concepteurs peuvent être tentés de soustraire ou additionner certaines mesures. Les résultats de ces opérations mathématiques peuvent paraître corrects, mais elles sont erronées. Prenons l'exemple suivant illustré au tableau 4.7. Nous avons relevé la hauteur de l'épaule en position assise puis la hauteur du coude dans la même position. La différence de ces deux mesures devrait

donner la longueur du bras c'est-à-dire la distance entre l'épaule et le coude. Le tableau 5.1 montre une incohérence pour les femmes. Selon nos calculs, le 5e centile est plus grand que le 50e centile. Il est préférable d'utiliser des équations de régressions multiples pour estimer certains segments manquants (Robinet et al., 2007; Rebiffé et al., 1982).

Tableau 4.7 : Soustraction de mesures

Mesures	Hommes			Femmes		
	5	50	95	5	50	95
Hauteur de l'épaule assis	549,15	600,89	655,85	522,99	566,04	615,05
Hauteur de coude assis	190,41	239,05	287,03	192,51	236,20	280,32
soustraction	358,74	361,84	368,82	330,48	329,84	334,73

Source : CAESAR : Summary statistics for the adult population (ages 18-65) of the United States of America.

Piège 4 : L'utilisation du 5e centile F et 95e H pour obtenir les "extrêmes"

Il est généralement convenu d'utiliser le 5e centile femme et 95e centile homme pour dimensionner en fonction des extrêmes. En utilisant ces extrêmes, la croyance veut que les concepteurs aient exclu 10% de la population et satisfassent ainsi 90% des utilisateurs. Certaines manipulations avec les données de CAESAR mettent en évidence que cette interprétation est fausse. En effet, cette compréhension se base sur le principe que 5% des femmes dont les mesures utilisées sont inférieures au 5e centile et 5% des hommes dont les mesures sont supérieures au 95e centile seront exclus. À certains égards, il est possible que la mesure de la femme soit supérieure à celle de l'homme. C'est le cas, par exemple, des données relatives à la largeur des hanches en position assise. Selon le tableau 4.8, si nous utilisons le 95e homme, soit 435mm pour déterminer la largeur maximale pour le siège d'une automobile, c'est près de 25% de la population qui sera exclue, soit 5% des hommes et 20% des femmes, c'est-à-dire l'ensemble des individus dont la mesure sera supérieure à 435mm. En effet, les femmes ont généralement les hanches plus larges que les hommes. Le principe du 10% d'exclusion par l'utilisation du 5e femme et du 95e homme, nécessite deux conditions : que le 5e centile femme soit inférieur au 1er centile homme et que le 95e centile homme soit supérieur au 99e centile femme. Après consultation, sur 99 segments offerts par le sommaire de l'enquête CAESAR, 40 segments ne respectent pas les deux conditions.

Tableau 4.8 : Mesure de la largeur des hanches pour les hommes et femmes

Centiles	Homme (mm)	Femme (mm)
1	310,53	331,48
2	319,74	337,97
3	323,44	342,50
5	328,96	348,43
20	337,43	357,72
20	348,96	372,15
25	353,67	376,74
50	371,62	403,38
75	393,15	434,02
80	399,85	443,25
90	415,64	470,72
95	435,42	501,04
97	447,40	524,38
98	463,17	533,72
99	482,99	556,62

Piège 5 : Établissement du pourcentage d'exclusion en fonction des représentations frontières

Les concepteurs utilisent rarement un seul segment pour dimensionner un objet, surtout pour les objets complexes comme les véhicules de transport. Or, l'utilisation de plusieurs mesures pour dimensionner un produit peut contribuer à exclure davantage d'individus que le 10% attendu. En effet, les données présentées sous forme de tableaux et les représentations 2D des abaques dont les segments sont tous du même centile ne reflètent pas la nature multivariante des utilisateurs. L'Ellipse, basée sur des algorithmes de distribution normale à deux variables de Sokal et Rohlf (1981), permet de prendre compte des individus avec des mesures atypiques. Créant un nuage de point, chaque individu est représenté en fonction des deux segments pris en considération (Fig. 4.1). La prise en compte de deux variables comme la hauteur des yeux ainsi que la longueur de la cuisse (fesses-genou) nous amène à prendre en considération 4 types d'individus possédant des mesures frontières dessinées par une ellipse (Tab. 4.9). L'Ellipse est établie en fonction du pourcentage d'individu retenu ou favorisé, on parlera alors d'une ellipse à 95, 97,5 ou 99%. Harrison, et al., (2005) ont déterminés à l'aide d'une ellipse à 99%, les dimension de deux tailles pour un casque de protection.

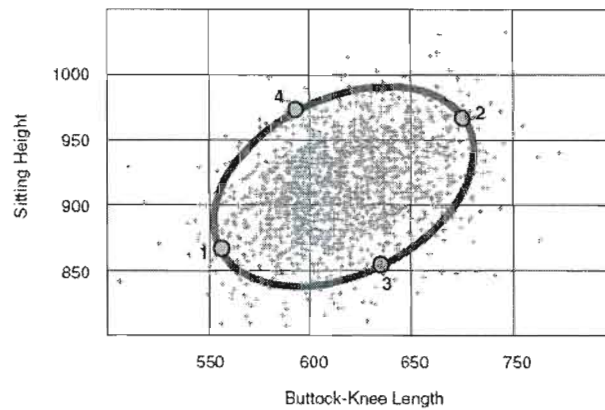


Figure 4.1 : Distribution de deux variables anthropométriques. (Dainoff et al., 2004.)

Tableau 4.9 : Représentations frontières sur une ellipse

Type	Représentation
1	Individus avec un petit buste et de petites cuisses
2	Individus avec un long buste et de grandes cuisses
3	Individus avec un petit buste et de plus grandes cuisses
4	Individus avec un long buste et de plus petites cuisses

L'Ellipsoid (analyse sous forme de ballon de football) permet en compte simultanément trois variables. Cependant, il est important de préciser qu'au-delà de trois variables il n'existe pas de modèle ou de solutions prêtes à l'utilisation. Zehner (1996) a mis en évidence que plus les concepteurs considèrent de segments, plus ils excluent d'individus. Après validation à partir d'un prototype de cockpit d'avion, 33% des individus qui ont participé au banc d'essai ont été considérés comme exclus (Fig. 4.2). Cela met en évidence que le format de présentation des données trouvées dans les tables et des abaques présente une réelle limite. En effet, l'utilisation des tables permettrait simultanément la prise en considération de plus de deux variables.

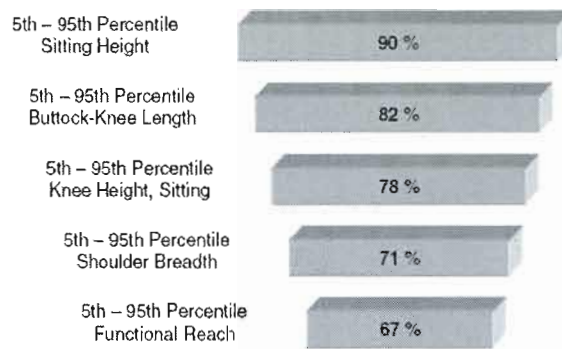


Figure 4.2 : Addition des exclusions. (Dainoff et *al.*, 2004.)

4.3 SYNTHÈSE

Les designers impliqués dans la conception de produits militaires et/ou civils doivent compter sur des données actuelles, ce qui n'est pas le cas. L'ensemble des comparaisons montre que les plus grands écarts sont davantage observés au niveau des centiles frontières. Ces écarts peuvent influencer les dimensions des produits, car les designers utilisent largement ces centiles frontières offerts par les abaques, soit le 1er, 2.5e ou 5e et le 95e, 97.5e ou 99e, pour établir les premières dimensions d'un concept. L'incohérence règne entre les différents ouvrages. Sur un intervalle de 42 ans, on observe une transformation morphologique chez les civils et les militaires. Chez les civils, bien que les hommes et femmes aient grandi, les écarts sont observés davantage au niveau des segments liés à l'obésité comme la largeur des épaules, des circonférences de la poitrine, de l'abdomen et de la longueur de la cuisse. Chez les militaires, on observe une transformation moins grande au niveau des mêmes segments, mais contrairement aux civils leur hauteur des jambes a connu une croissance alors que celle des civils a connu une décroissance. On observe également des écarts importants entre les mesures des civils (CAESAR 2002) et militaires (ANSUR 1988). En effet, les mesures de l'enquête ANSUR ne collent pas aux mesures de réels utilisateurs, soit des civils d'aujourd'hui. On observe également des écarts tout aussi importants entre (CAESAR 2002) et les abaques. Des écarts notables allant de 20 à 69 mm chez les hommes et de 20 à 97 mm chez la femme. Ces résultats mettent en évidence que

certains facteurs sociaux comme l'obésité et l'immigration ont une influence considérable sur la transformation des morphologies.

Nos recherches ont permis également d'identifier des incohérences liées à une manipulation erronée des ouvrages. Certains formats de présentation pourraient amener les concepteurs à établir de mauvais diagnostics au niveau du dimensionnement. À titre, d'exemple l'utilisation des centiles ou des représentations 2D dont l'ensemble des segments sont tous de même centile ne tient pas compte de la nature multivariante des différents utilisateurs. L'utilisation de plusieurs mesures pour dimensionner un produit peut contribuer à exclure davantage d'individus qu'attendu. Les incohérences à la fois au niveau des données et des manipulations, mettent en évidence la nécessité d'offrir aux concepteurs des représentations avec des mesures atypiques, souffrant d'obésité androïde ou d'autres types d'obésité, compte tenu des transformations observées.

CHAPITRE V

ANALYSE DES MODULES ANTHROPOMÉTRIQUES DE LOGICIELS DE CAO

Pour avoir une idée de l'état de l'art en matière de représentation numérique humaine, une revue critique a été effectuée avec trois logiciels : CATIA V5 R16, NX 6 et ManneQuinELITE. Ces derniers ont été sélectionnés à partir de logiciels disponibles dans des laboratoires de quatre universités dispensant des programmes liés à la conception de nouveaux produits : l'Université du Québec à Montréal (l'École de design), l'École de technologie supérieure (Génie mécanique), l'École Polytechnique de Montréal (Génie mécanique) et l'Université McGill (Génie mécanique). Différentes manipulations de logiciels ont permis de mettre en lumière quelques limites liées à leur utilisation. Notre analyse a porté plus spécialement sur les aspects susceptibles d'être utiles lors du dimensionnement des objets, notamment l'apparence des mannequins, leurs caractéristiques physiologiques, les modalités liées à leur construction, la distribution de la masse grasseuse, les techniques de manipulation et la représentation du champ visuel. Mais, avant de présenter cette analyse, nous situerons d'un point de vue historique, l'apparition des représentations digitales humaines — Digital Human Modeling (DHM).

5.1 HISTORIQUE

Certains ouvrages nous ont permis de tracer l'apparition des représentations digitales humaines (Dooley, 1982; Fetter, 1982; Chaffin, 2001). William Fetter, concepteur chez Boeing, a réalisé en 1959, à l'intérieur même d'une problématique de conception, la première image d'étude d'humain. La figure en deux dimensions a été graduellement améliorée pour satisfaire le degré de réalisme exigé par les simulations. The First Man, développé en 1968

pour la conception du tableau de bord du Boeing 747, était composé de sept segments mobiles qui pouvaient être articulés au bassin, au cou, aux épaules et aux coudes pour reproduire approximativement les mouvements des pilotes (Fig. 5.1). Par la suite, le modèle a connu quelques améliorations pour se présenter sous forme de trame ombragée et colorée (The 4-th Man). Parallèlement à ce dernier, un certain nombre de logiciels anthropométriques furent développés : i) Cyberman créé par Chrysler Corporation — comptant 15 segments sans contrainte au niveau des articulations — permet d'analyser sommairement les postures acceptables dans un habitacle automobile ; ii) Combiman, le premier modèle biomécanique conçu conjointement par Aerospace Medical Research Laboratory et the University of Dayton Research Institute pour la conception de cockpits d'avion — comptant 33 segments avec des articulations contraignantes — permet de déterminer la capacité d'atteindre, selon des postures réalistes, différents points préalablement définis ; iii) Sammie développé à l'Université de Nottingham pour des applications anthropométriques générales¹¹, d'analyse et de conception en milieu de travail et iv) Boeman conçu par Boeing Corporation en 1969, un précurseur de nombreux programmes de modélisation anthropométrique d'aujourd'hui. Adapté à partir de différentes études ergonomiques et bases de données (Dreyfus, Dempster et Hertzberg), il offre les mêmes analyses que ses prédécesseurs et permet d'identifier les collisions physiques et les obstructions visuelles.

¹¹ Dans l'éventualité d'un échec lors d'une simulation d'atteinte, le logiciel estimait la distance manquante.

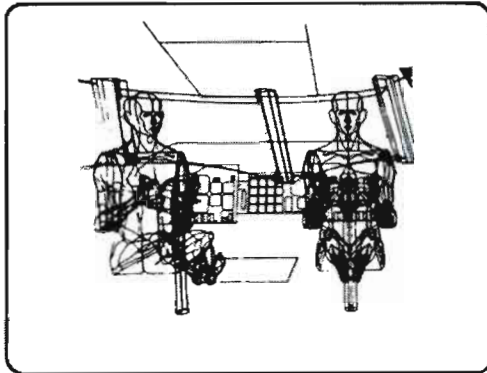


Figure 5.1 : The First Man. (Fetter 1982.)

Avec l'augmentation de la capacité des ordinateurs, les logiciels se sont de plus en plus raffinés : Jack®, Catia/Safework®, ManneQuinPRO™, Ramsis®, MAN3D, Bodyworks. Présentement, on assiste à la naissance du logiciel Santos™, développé en collaboration avec l'armée américaine et l'Université de Iowa qui offrira des représentations basées sur une structure squelettique plus près de l'humain (Yang et al., 2006).

5.2 MANNEQUIN NUMÉRIQUE : UNE NOUVELLE FORME DE REPRÉSENTATION DE L'HUMAIN

La création des premiers mannequins numériques a contribué à l'émergence d'un nouveau champ de recherche : les simulations virtuelles 3D avec des représentations digitales humaines (Digital Human Models — DHM). Les simulations reposent le plus souvent sur la mise en œuvre de modèles mathématiques et informatiques. Ils servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un concept et d'en prédire son fonctionnement. Les outils de simulation sont nombreux. Le répertoire des ressources en modélisation et simulation du Canada (RRMS) compte près de 400 logiciels de simulation. Différents domaines contribuent à parfaire ces représentations pour différents domaines d'application : i) la conception de chaîne de montage, de production et leur maintenance (Chaffin, op.cit.) ; ii) le domaine médical pour la formation de chirurgiens à partir de simulations opératoires complexes que peuvent présenter certains cas (Moline, 1997 ; Miller 2000 ; Laugier et al., 2001) ; iii) le domaine de la sécurité routière pour mesurer les impacts sur les tissus humains

lors de collision avec un véhicule (le projet européen HUMOS 2¹²) ; iv) le domaine de la conception de produits et plus particulièrement pour la conception de véhicules de transport (Wang et al., 2003; Yang op.cit.; Pinto et Taneja, 2005; Troy et al., 2004) ; iv) le domaine du divertissement (jeu vidéo, cinéma, etc.).

Le sujet de recherche est en émergence. Il foisonne de nouvelles informations au quotidien, aiguillé vers la précision du modèle anatomique très complexe à simuler et imprécis jusqu'à maintenant. Selon la Digital Human Modeling for Design & Engineering Conference (DHMC), en matière de technologie de simulation numérique, les intérêts se portent actuellement sur les aspects suivants : l'anatomie humaine, les proportions et les morphologies plus réelles, les méthodes de mesures avancées, la biomécanique de l'Homme, c'est-à-dire la démarche et les déplacements pour les analyses dynamiques avec et sans charges, la capture de mouvements, la prise en compte de tissus mous, d'organes, de vêtements, de certains équipements ainsi qu'au niveau cognitif et perceptif (vision, audition, l'haptique, l'action humaine, etc).

5.3 DESCRIPTION DES LOGICIELS ANTHROPOMÉTRIQUES ANALYSÉS

Dans ce chapitre, nous avons analysé les trois logiciels : CATIA V5 R16, NX 6 et ManneQuinELITE. Catia et NX sont vendus comme une solution axée sur l'ensemble du processus touchant à la fois le cycle de conception et de production. Ils sont vendus avec différents bouquets pouvant contenir plusieurs modules variés et avancés : analyse d'éléments finis, conception d'outils de production, module ergonomique avec mannequins numériques. Pour sa part, ManneQuinElite est un logiciel d'évaluation possédant un module anthropométrique et d'évaluation ergonomique.

¹² HUMOS 2 vise globalement à améliorer la sécurité routière en développant les connaissances sur le comportement mécanique des tissus biologiques mous: (muscles, tendon et ligament) (Site web : <http://humos2.inrets.fr>, dernier accès : août 2009).

Catia, depuis l'acquisition de Safework¹³ par Dassault Systèmes, offre 4 modules d'ergonomie : i) Human Builder, permettant de créer et de manipuler des mannequins ; ii) Human Measurements Editor, permettant de modifier les mesures des 104 segments offerts ; iii) Human Posture Analysis, permettant d'analyser les postures créées et ; vi) Human Activity Analysis, permettant d'analyser le confort et la sécurité d'une tâche, lors d'une manutention avec ou sans charge, en conformité avec des analyses et standards ergonomiques connus (Lynn McAtamney, E. Nigel Corlett, Snook et Ciriell 1991, NIOSH 1981 et 1991).

NX de Siemens offre principalement un module anthropométrique (Mannequin), un module d'analyse des zones d'atteinte ainsi qu'un module traitant l'analyse de confort pour des postures statiques à partir d'études connues (Porter 1998, Granjean 1980, Pebiffe 1969 et Dreyfus 2D et 3D). NX offre également un module facilitant la prédiction des postures de l'ensemble du corps, en réponse à la configuration de l'environnement et selon des modèles développés par the Automotive Seat and Package Evaluation and Comparison Tool (ASPECT) programme piloté par University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI). Malheureusement, nous n'avons pas été en mesure d'analyser ce module, car il ne fait pas partie du bouquet de base.

ManneQuinElite, pour sa part, n'est pas un logiciel de CAO, mais plutôt un logiciel d'évaluation ergonomique avec un module anthropométrique et d'évaluation ergonomique. Contrairement à Catia et NX, il ne permet pas d'évaluer les concepts dans l'environnement natif de CAO. Le concepteur doit importer le fichier CAO, c'est-à-dire le modèle numérique du concept dans ManneQuinElite et procéder au dimensionnement et aux évaluations, puis revenir dans le logiciel de CAO pour faire les corrections et changements appropriés.

¹³ Safework a été le nom commercial d'un logiciel anthropométrique développé à l'École Polytechnique de Montréal, dans les années 80.

5.4 ANALYSE CRITIQUE DES LOGICIELS ANTHROPOMÉTRIQUES SÉLECTIONNÉS

Cette revue critique a été effectuée à partir de résultats de différentes manipulations. Compte tenu des délais liés à la réalisation de l'étude, nous nous sommes principalement intéressés aux aspects et fonctions liées à l'anthropométrie comme l'apparence des mannequins, les caractéristiques anatomiques, les caractéristiques liées à la construction, la distribution de la masse grasseuse, la manipulation des mannequins ainsi que la vision et ses champs.

5.4.1 L'apparence des mannequins

Les mannequins sont construits à partir de surfaces polyèdres, apparaissant comme une série de surfaces plates. Ils sont construits à partir de principes géométriques, c'est-à-dire par des points localisables dans un plan en trois dimensions (x,y,z) ainsi que des vecteurs. Deux points déterminent un vecteur, puis un troisième ou plusieurs autres points déterminent une surface. Plusieurs surfaces déterminent à leur tour les différents segments (Fig 5.2).

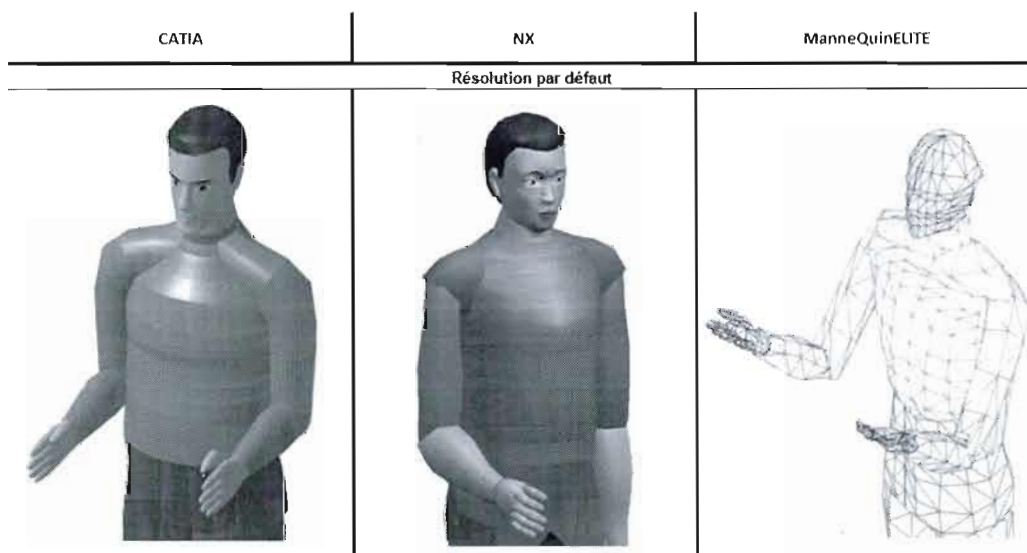


Figure 5.2 : Apparence des mannequins numériques

Chaque segment est composé de sites permettant la localisation de l'armature de chaque segment voisin. Les segments sont habituellement reliés par des articulations pour permettre les mouvements. Les polyèdres des mannequins du logiciel CATIA ont la particularité d'être contenus dans des ceintures indépendantes, collées les unes aux autres (Fig. 5.2). Cette structure permet d'offrir les circonférences au niveau des mesures, mais confère au mannequin l'aspect d'un baril. Les représentations offertes sont grossières. Elles peuvent être utiles pour dimensionner un habitacle lié à un produit de transport, mais sont incomplètes au niveau de la forme de la tête, c'est-à-dire pour des produits liés à des ajustements plus précis comme des casques de protection (Blanchonette, 2006). Soulignons également que malgré leur apparence les mannequins ne sont pas vêtus et aucun accessoire n'est disponible.

Le concepteur peut styliser les mannequins sous différents aspects. À titre d'exemple, ManneQuinElite offre cinq représentations : humaine, robot, bonhomme allumette, squelette et forme humaine (Fig. 5.3). La première manipulation réalisée avec ManneQuinElite met en évidence que le style appliqué influence la représentation du volume de certains segments. Après avoir créé deux mannequins hommes du 50e centile pour la stature et le poids, nous avons appliqué pour l'un le style "Humain" et pour l'autre le style "Forme Humaine". Comme l'illustre la figure 5.4, la longueur des pieds du mannequin avec le style "Humain", en jaune pâle, est moins bien défini et surtout plus longue que les pieds définis avec le style "Forme humaine" en bleu foncé. Cette manipulation n'a pu être réalisée avec des mannequins femmes, car le style "Forme humaine" n'est pas offert pour les modèles féminins. Cette lacune pourrait mener le concepteur à faire de faux diagnostics lors du dimensionnement d'un produit destiné principalement à une clientèle féminine.

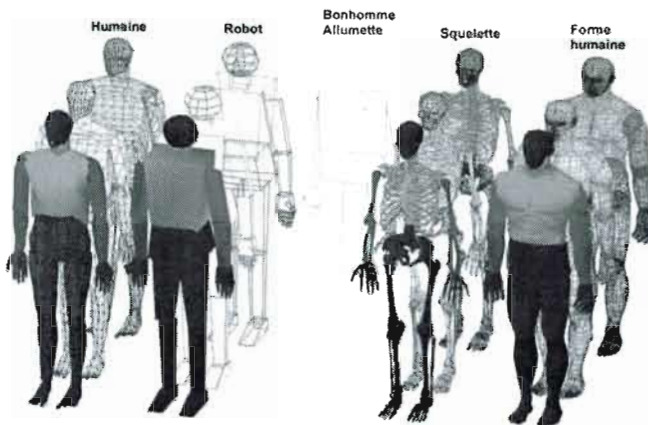


Figure 5.3 : Les différents styles offerts par ManneQuinELITE



Figure 5.4 : Superposition Humaine (jaune pâle) et Forme humaine ManneQuinElite (bleu foncé)

Bien que les représentations digitales humaines soient plus précises que les représentations 2D que l'on peut retrouver dans les abaques traditionnels, l'ensemble des mannequins étudiés possède des surfaces grossières qui leur donnent un caractère peu réaliste au niveau morphologique (Fig 5.5 — Jill/NX). En contrepartie, d'un point de vue figuratif, les logiciels de CAO offrent des modules de rendu couleur qui permettent de réaliser des illustrations couleur des produits et espaces d'un réalisme surprenant. Une seconde manipulation met en évidence un écart considérable par rapport au mannequin anthropométrique Jill comme le montre la figure 5.5. En effet, les logiciels figuratifs Poser ou 3ds Max offrent la possibilité de créer des personnages plus détaillés [Gizelle] qui s'intègrent plus harmonieusement aux

illustrations réalistes souvent exigées en design lors des présentations finales d'un concept ou pour les outils promotionnels du futur produit.



Figure 5.5 : Comparaison entre un mannequin femme Jill de NX et Gizelle de Poser

5.4.2 Caractéristiques anatomiques des mannequins

Deux éléments tendent à contribuer à l'efficacité pour positionner les mannequins dans des postures précises, soit le nombre de segments et le nombre de degrés de liberté (DDL)¹⁴ pour chaque articulation. Le nombre de segments et d'articulations varie d'un logiciel à l'autre (Tab. 5.1). Des manipulations ont permis de constater que certaines régions anatomiques ne disposent pas suffisamment de segments et d'articulations pour reproduire des postures précises. Contrairement au logiciel de Catia et d'NX, les représentations de

¹⁴ Les degrés de liberté (DDL) (degree of freedom, DOF) sont l'ensemble des déplacements indépendants qui indiquent complètement la position déplacée ou déformée du corps ou du système. Ils peuvent être composés de trois mouvements : premier degré, flexions et extensions / deuxième degré, abductions et adductions / troisième degré, rotation vers la droite ou la gauche. Ces déplacements sont présentés en annexe III.

ManneQuinELITE disposent uniquement de deux articulations pour la colonne vertébrale : l'une aux vertèbres thoraciques et l'autre à la région lombaire. De plus, il est important de préciser que ce ne sont pas tous les segments et les degrés de liberté qui sont manipulables. Ils demeurent donc théoriques.

Tableau 5.1 : Segments, articulations, degré de liberté des trois logiciels

CATIA	NX	ManneQuinELITE
Nombre de segments		
100 segments	77 segments 18 au niveau dorsal 17 au niveau de la main	46 segments 16 au niveau de la main
uniquement 71 peuvent être directement sélectionnés	uniquement 67 peuvent être directement sélectionnés	L'ensemble des segments peut être directement sélectionnés
Nombre d'articulation		
75 articulations articulés et obéissant à des limites dérivées d'étude de la NASA	76 articulations	46 articulations
Nombre de degrés de liberté		
148 degrés de liberté épaules 10 (6 p. les bras et 4 p. les clavicules) les avant-bras 4 poignets 4 doigts 40 tête 3 thorax 3 région lombaire 3 cuisses 6 jambes 4 chevilles 4 orteils 2 vision centrale 2 mais uniquement 85 peuvent être directement manipulables.	135 degrés de liberté épaules 6 les avant-bras 2 poignets 6 doigts 40 tête 3 thorax 3 cuisses 6 jambes 2 chevilles 6 orteils 1 mais uniquement 75 peuvent être directement manipulables. basés également sur une étude de la NASA (Rapport technique NASA RP-1024).	85 degrés de liberté épaules 6 les avant-bras 2 poignets 6 doigts 44 tête 3 thorax 3 région lombaire 1 cuisses 6 jambes 2 chevilles 4 mais uniquement 77 peuvent être directement manipulables. Il est possible d'obtenir les coordonnées en X,Y,Z pour chacun des segments, ainsi que leur degré de rotation, leurs centres de masse, leurs forces, leurs moments et leurs moments initiaux.

Les DDL sont un argument de marketing important pour la vente de ces logiciels. Cependant, par l'absence de composantes anatomiques comme les muscles et les tendons, ces représentations se trouvent à être construites uniquement sur des principes empruntés à la robotique. La reproduction de mouvement est moins fluide que ceux du corps humain pourvu de structures plus complexes et élastiques. À titre d'exemple, l'articulation de

l'épaule avec ces 5 DDL¹⁵ est la plus mobile à reproduire. Différentes manipulations au niveau de l'épaule ont permis de montrer que les représentations du logiciel CATIA, réussissent à augmenter sa zone d'atteinte de 70 mm avec son plan de glissement permettant un mouvement vers l'avant-arrière (Fig 5.5). L'épaule des mannequins d'NX et de ManneQuinELITE ne permet pas, avec 3 DDL, la reproduction de mouvements complets et naturels du bras. Ces incapacités peuvent mener à de faux diagnostics lors du dimensionnement (Tab. 5.1).

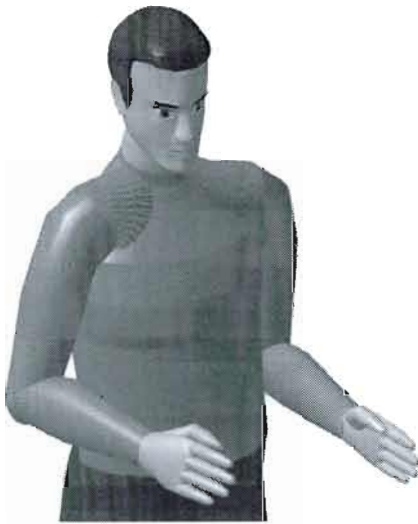


Figure 5.6 : Déplacement de l'épaule pour Catia

La représentation de structures complexes comme la main demeure insuffisamment modélisée¹⁶; bien que des recherches et des efforts se poursuivent pour en arriver à des

¹⁵ L'articulation de l'épaule complète avec 5 DDL, plus précisément 3 DDL au niveau du bras qui permet les mouvements de flexion/extension, abduction/adduction ainsi que la rotation médial/latéral et 2 DDL pour la clavicule qui permet un mouvement élévation/dépression, c'est-à-dire vers le haut et le bas et flexion/extension ou antéro/postérieur qui permet un mouvement vers l'avant et l'arrière.

¹⁶ La main humaine est également régie par des mouvements complexes. Elle compte 28 degrés de liberté : vingt-deux (22) sont associés aux différentes articulations des doigts et six (6) au niveau du poignet : 3 rotations et 3 translations (Ouhaddi et Horain, 1998). Plus précisément, les articulations

modèles plus réels comme le logiciel Santos (Yang, op.cit.). Différentes manipulations ont permis de constater que le logiciel ManneQuinELITE est le seul qui respecte les degrés de liberté de la main, alors qu'aucun ne présente l'ensemble des DDL au niveau du poignet (Tab. 5.1). En l'absence d'une structure squelettique complète et de l'ensemble des éléments qui permet une prise en compte de la biomécanique humaine, il devient plus difficile de simuler adéquatement l'utilisation efficace d'un outil manuel, par exemple, ou tout autre objet demandant des manipulations plus fines. Précisons que les orteils des mannequins de Catia et de NX sont soudés, leur seul degré de liberté permet tout au plus de positionner le mannequin sur la pointe des pieds. Ces représentations ne permettent pas à des designers de valider en amont du projet certains principes liés à la conception d'une chaussure pour des activités sportives.

5.4.3 La construction des mannequins : choix de populations, de variables anthropométriques, de mesures et centiles

En général, la construction des mannequins se fait d'abord par la définition d'une série de facteurs de variations anthropométriques comme le choix de la population, le genre, le centile pour la stature et/ou le poids. Les facteurs de variations et certains attributs varient d'un logiciel à l'autre.

Sur le plan du choix des populations, seul NX offre le choix entre une base de données militaires ANSUR 1988 ou civiles NHANES. L'origine de la base de données employée par CATIA n'est pas identifiée. Il est possible de gérer des hommes et des femmes adultes sans préciser l'âge. ManneQuinElite a cependant l'avantage de générer des mannequins enfants de 3 à 12 ans (Fig 5.2).

interphalangiennes distales (IPD), ou pour le pouce interphalangiennes (IP) ainsi que les articulations proximales (IPP), compte 1 DDL, alors que les articulations métacarpo-phalagienne (MCP) compte chacune 2 DDL. L'articulation à la base du pouce a la particularité de présenter 3 DDL, donnant ainsi au pouce une plus grande mobilité.

Tableau 5.2 : Caractéristiques communes liées à la construction des mannequins

CATIA		NX	ManneQuinELITE
Base de données et populations			
Indéterminé	Américaine Canadienne Française Japonaise Coréenne	ANSUR NHANES Américaine	ANSUR Indéterminé NASA SAE, SP-450, 1977 USA army Grande Bretagne Française Polonaise Suisse Japonaise Chine du sud Europe du nord NASA Std-300 Enfants 3 à 12 ans
Nombre de variables anthropométriques			
103 La fonction filtre permet de regrouper certains segments, selon les différentes parties du corps		27	12 L'ensemble des données n'est pas présenté selon un format standard
Types de mesures			
circonférence, longueur, largeur, profondeur, stature et poids		longueur, largeur, stature, poids	largeur, longueur, épaisseur pour chacun des segments
Centile			
entre 0,01 et 99,99 Pour la taille et le poids L'index, le préfixe, la moyenne, l'écart-type sont disponibles pour chacun des segments		1, 5, 50, 95, 99 Attribuable indépendamment pour la taille et le poids	2.5, 5, 50, 95, 97.5 Attribuable indépendamment pour la taille et le poids Différents types de morphologies "Body type" sont disponibles (mince, moyen, gros)
Point de référence			
Œil, Point H, projection du Point H, pied droit ou gauche, entre les pieds, entre les jambes		Œil gauche ou droit, Point H, Orteil gauche ou droit	

Une fois le mannequin généré, le concepteur peut modifier l'ensemble des variables anthropométriques, qui varient considérablement d'un logiciel à l'autre (Fig. 5.2). Seul, CATIA offre pour chaque variable présentée en mm et en centile la borne inférieure et la borne supérieure. À moins de désactiver la fonction interpolation, les concepteurs ne peuvent inscrire une mesure hors frontière et créer ainsi des représentations qui risquent de ne pas exister. Dans le cas de NX et de ManneQuinELITE, le concepteur peut inscrire librement une valeur pour quelques mesures ou pour la totalité des mesures. Si le concepteur n'est pas

en mesure de compléter tous les champs, les dimensions manquantes seront établies selon une équation linéaire¹⁷.

Les manipulations réalisées avec CATIA au niveau des valeurs des variables anthropométriques se sont avérées complexes et malgré la fonction interpolation activée, nous avons généré d'étranges représentations. En effet, nous avons tenté de générer une représentation avec des mesures atypiques, c'est-à-dire avec de petites jambes et un long tronc. Pour générer cette représentation du 97,5e centile au niveau de la stature, nous avons identifié deux mesures à modifier : la hauteur de la taille au niveau du nombril et la hauteur de la jambe. Les manipulations nous ont permis de mettre en évidence que les représentations générées sont différentes selon la séquence des étapes suivies ainsi que selon l'ordre des segments modifiés. Le tableau 5.3 montre les différentes valeurs obtenues selon les différentes manipulations effectuées.

Tableau 5.3 : Valeur modifiée pour la création d'une représentation avec des mesures atypiques

Manipulation	CATIA / Homme 97,5 ^e	Valeur minimale	Centile obtenu
Sélectionner la fonction " <i>manuel</i> " pour la première mesure et procéder à la modification, puis faire de même pour la seconde mesure.			
1	Hauteur de la taille Waist height, omphalion	1065,62	55,33
2	La hauteur de la jambe Crotch Height Standing	775,87	9,22
3	La hauteur de la jambe Crotch Height Standing	814,60	31,24
4	Hauteur de la taille Waist height, omphalion	1032,40	30,21
Sélectionner la fonction <i>manuel</i> pour les deux mesures puis procéder aux modifications			
5	Hauteur de la taille Waist height, omphalion	1065,62	55,33
6	La hauteur de la jambe Crotch Height Standing	843,48	55,40
7	La hauteur de la jambe Crotch Height Standing	814,60	31,24
8	Hauteur de la taille Waist height, omphalion	1090,70	73,45

¹⁷ La régression linéaire consiste à déterminer une estimation des valeurs a et b et à quantifier la validité de cette relation grâce au coefficient de corrélation linéaire. On représente dans un graphe l'ensemble de ces points représentant des mesures d'une grandeur y_i en fonction d'un autre x_i.

Dans le but de mieux visualiser la manipulation 1, nous avons superposé l'image de la représentation atypique désirée à celle du 97.5e centile. Comme le montre la figure 5.7, le cou et le corps du mannequin ont considérablement été allongés. Cette représentation existe-t-elle vraiment ? De plus, en observant de plus près, nous pouvons constater que la longueur des bras a diminué de 53.8mm. Cela met en évidence que certaines variables sont liées entre elles. La manipulation des valeurs sous le contrôle manuel s'avère difficile et peut représenter une source d'erreur importante, car certains segments demeurés sous la fonction automatique peuvent être liés aux segments modifiés. Ceci exige de la part des utilisateurs de connaître les relations entre l'ensemble des 103 segments.

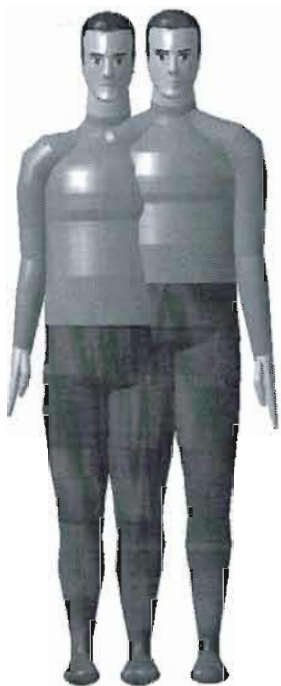


Figure 5.7 : représentation
avec mesures atypiques
VS la représentation du 97.5^e

Pour terminer, les logiciels permettent de sauvegarder les différents types de mannequins construits, ce qui peut présenter une économie de temps pour de futurs projets.

Les concepteurs peuvent également positionner et superposer plusieurs mannequins à partir d'un même point de référence. À titre d'exemple, un concepteur peut fixer les plages d'ajustement d'un siège de conduite automobile en positionnant et superposant le plus petit mannequin et le plus grand à partir du point H, point de référence situé au niveau des hanches.

5.4.4 Distribution de la masse grasseuse chez les mannequins

La troisième dimension introduit d'autres mesures qui ne sont pas prises en considération dans les enquêtes. De plus, le nombre limite de variables ne permet pas la construction d'un mannequin entier. Sachant que les représentations digitales humaines sont construites à partir de données d'enquête, cela laisse supposer que certaines données ont été obtenues à partir d'équations quelconques. Ces modèles mathématiques permettent-ils de créer des mannequins avec des morphologies variées, comme les représentations 3D obtenues grâce aux numérisations (cf. chapitre 3). D'un point de vue physiologique, plusieurs auteurs ont relevé des variations morphologiques importantes : Croney (1971) fait état d'intervariations de styles morphologiques pour certaines parties du corps ; Olivier (1961) traite des types de dos rond, normal et plat. Les manipulations que nous avons conduites mettent en évidence plusieurs incohérences, notamment sur le plan de la distribution de la masse grasseuse. Cette dernière se fait à partir d'un seul modèle mathématique, pour chacun des logiciels. Pour mieux évaluer le phénomène, nous avons superposé les images de mannequins homme et femme, du 50ième centile en taille et en poids sur des mannequins toujours du 50ième centile en taille, mais avec un poids correspondant à un indice de masse corporelle (IMC) de 34,9.

Comme nous pouvons le constater à l'aide des images superposées des figures 5.8 et 5.9, la répartition anatomique de la graisse des mannequins virtuels ne représente pas la réalité observée dans la population civile et diffère d'un logiciel à l'autre.

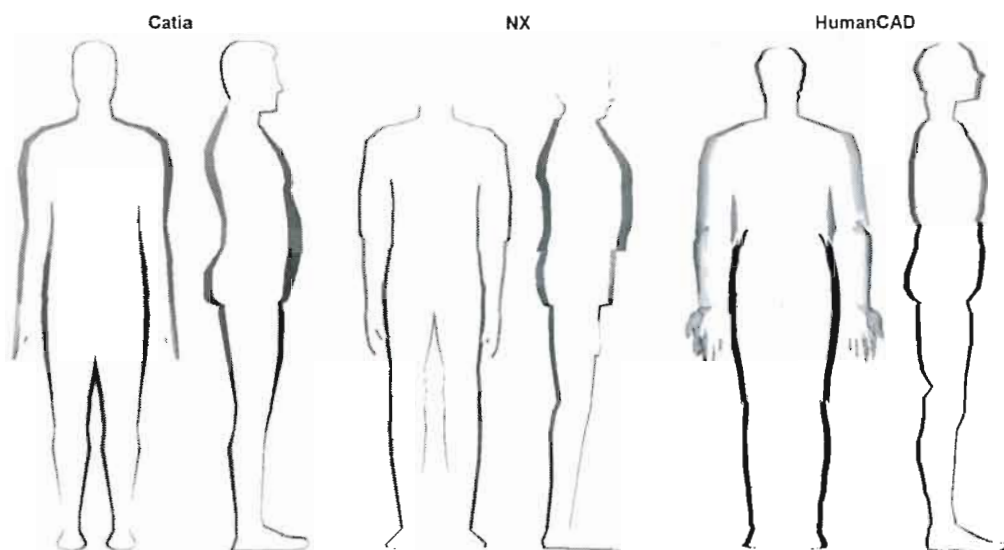


Figure 5.8 : Distribution de la masse grasseuse chez les hommes

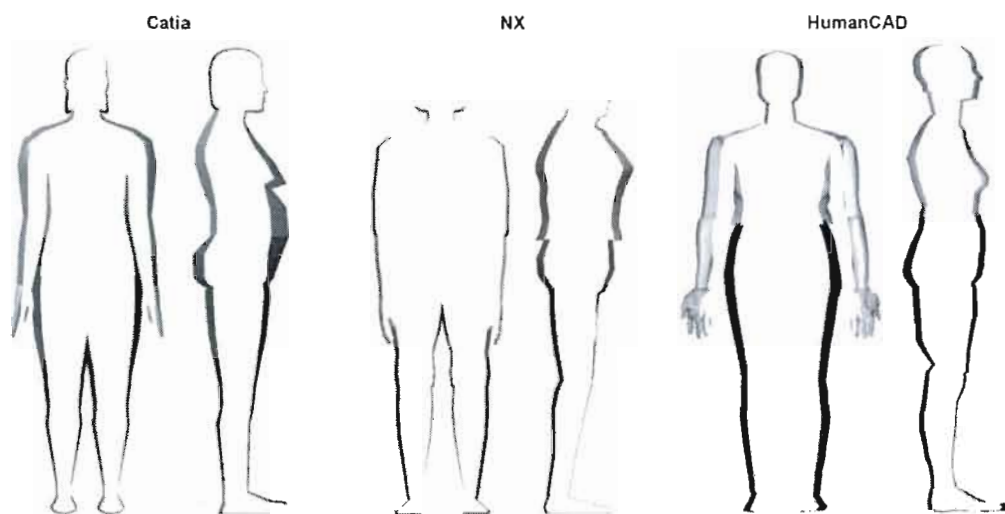


Figure 5.9 : Distribution de la masse grasseuse chez les femmes

Pour NX, nous avons constaté chez l'homme que la profondeur de la cage thoracique est plus profonde que l'abdomen à la hauteur du nombril. La masse adipeuse ne se localise pas à l'abdomen, mais surtout au bas ventre. Au niveau figuratif, on peut observer que le profil du bas-ventre ne colle pas à la réalité (Fig 5.8). Pour les jambes, le gras s'est réparti uniquement vers la région postérieure de la cuisse et du mollet. De plus, contrairement aux

représentations des autres logiciels, le gras s'est également réparti au bas du grand dorsal. La masse adipeuse chez la femme s'est faite en tout point pareil que chez l'homme, alors qu'en réalité chez la femme, les graisses se localisent davantage au niveau de l'abdomen, des hanches, du fessier, des cuisses et des avant-bras. Pour terminer, au niveau figuratif on observe tout comme chez l'homme, que la cage thoracique et le bassin ne forment pas une structure fermée chez la femme (Fig. 5.9). L'absence de ces détails figuratifs pourrait sérieusement présenter des difficultés aux designers lors du dimensionnement d'équipements de protection, par exemple.

Pour CATIA, comparativement aux représentations de NX et ManneQuinELITE, la répartition de la masse grasseuse chez les représentations générées est plus fidèle à la réalité. Pour l'homme, les graisses se sont réparties au niveau de l'abdomen, du buste, des épaules, du fessier, et tout autour de la cuisse. Comparativement à l'homme, la répartition de la masse grasseuse chez la femme se fait davantage au niveau de l'abdomen, la poitrine, le fessier et les hanches. De plus, avec CATIA les graisses ne se sont pas réparties au niveau de la région dorsolombaire. Soulignons que CATIA est le seul à avoir été en mesure de générer une représentation souffrant d'obésité abdominale. Cependant, au niveau figuratif, on constate que chez la femme les seins et l'abdomen ont des contours non arrondis. On peut faire, pour les deux sexes le même constat pour le fessier.

Pour des raisons de disponibilité du logiciel, cette manipulation a été effectuée avec la nouvelle version de NexGEN, HumanCAD. Pour sa part, le mannequin de NexGEN a seulement élargi. Il n'a pratiquement pas épaissi, comme si la répartition de la masse était uniquement squelettique et non adipeuse. La vue de côté de la figure 5.9 montre chez la femme que la distribution de la masse se fait davantage au fessier, à la partie postérieure de la cuisse et aux hanches. On peut observer, pour la femme et l'homme que la masse s'est également répartie de façon démesurée à la tête et aux pieds. Ces représentations peuvent induire de faux diagnostics pour la conception d'objets liés aux produits sportifs comme des casques et chaussures.

5.4.5 La manipulation des mannequins

En général les logiciels offrent trois différentes façons de manipuler les mannequins dans le but de reproduire des postures spécifiques : i) des postures prédéterminées du corps entier sont offertes et spécifiquement pour les mains ; ii) la cinématique directe permet de définir individuellement l'angle des segments à partir de quelques joints avec ou sans grande précision ; iii) la cinématique inverse en temps réel permet de positionner le mannequin en fonction de la préhension d'un objet ou d'une cible précise.

5.4.5.1 Les postures prédéterminées

NX et ManneQuinElite offrent le plus grand nombre de postures prédéterminées, dans des contextes particuliers (Tab. 5.4). Cependant, les postures sont davantage liées aux activités de conduite automobile, de maintenance et de manutention. L'utilisateur peut disposer également de postures spécifiquement pour les mains. Afin de les rendre plus conformes à un contexte particulier, l'ensemble de ces postures peut toujours être ajusté par la suite au niveau des différentes articulations à l'aide de la cinématique directe.

Tableau 5.4 : Caractéristiques liées à la manipulation des mannequins

CATIA	NX	ManneQuinELITE
<i>Postures prédéterminées</i>		
7 postures Sit, Squat, Stoop, Twist, Lean, Adjust elbow	31 postures	38 postures surtout liées à l'activité de manutention
3 positions pour la main En cylindre, en sphère ou en pince	21 positions pour la main	9 positions pour la main
<i>Manipulations des segments individuellement (cinématique directe)</i>		
Standard pose Permet de procéder à des ajustements avec un principe d'incrémentations, en millimètre pour les 7 postures de base. Deux contraintes peuvent être appliquées ou non lors des manipulations c'est-à-dire, le maintien de la direction des yeux ainsi que la position et l'orientation des mains. Fonction : Forward Kinematics Les limites articulaires ne sont pas offertes et les manipulations se font pour chaque DOF avec la souris de façon grossière sans précision. Fonction : Posture Editor Permet de manipuler, 51 segments, au degré prêt ou en pourcentage pour chacun des DOF. Les limites articulaires ainsi que les points de vue optimaux peuvent être créés.	Permet de procéder à des ajustements avec la souris en déplaçant un compas fixé sur les joints amovibles ou avec une plus grande précision en inscrivant la valeur en degré pour chaque degré de liberté offert pour chacun des joints	Les limites articulaires ne sont pas offertes et les manipulations se font avec la souris de façon grossière sans précision
<i>Cinématique inverse</i>		
L'utilisateur doit fixer uniquement des contraintes spécifiques pour la direction de certaines parties du corps, comme la tête, plus précisément la région thoracique et/ou lombaire pour la colonne vertébrale, la région pelvienne et pour l'équilibre du mannequin. La manipulation de la région pelvienne se fait par translation (avant ou arrière et/ou de haut en bas) et/ou par rotation (de haut en bas et/ou de gauche à droite). Les pieds peuvent être fixés au sol et certains segments peuvent être fixés en place, pour aider à créer plus facilement la posture désirée. La distance parcourue par le segment est également affichée lors des manipulations.	Il y a deux méthodes possibles Glissement dynamique Produire une posture par le déplacement d'un ou de quelques segments clés. Zone d'atteinte active Générer une posture en fonction de l'emplacement et la position des mains.	La fonction de la cinématique inverse n'est pas disponible, par contre elle sera disponible dans la prochaine version HumanCAD 1.0.
<i>Zone d'atteinte</i>		
Présenter visuellement mais pour un seul segment à la fois. L'aire d'atteinte fait le tour du mannequin laissant croire qu'il est en mesure de rejoindre tous les points situés sur la surface de la géométrie. Cette représentation est fautive et pourrait induire le concepteur à faire de mauvais diagnostics, notons également que la fonction zone de confort n'est pas disponible.	En plus d'offrir le volume représentant la zone d'atteinte sans mouvement pour les mains (Fig. 7.10), le concepteur peut obtenir la zone d'atteinte avec la rotation de la taille, c'est-à-dire en fonction de l'angle de flexion et angle latéral.	Le volume représentant la zone d'atteinte sans mouvement pour les mains et les pieds sont également disponibles.
<i>Analyse de l'activité</i>		<i>Analyse de l'activité</i>
À partir d'outils connus RULA NIOSH 1981/1991 équations de Snook et de Ciriello Les outils offerts se concentrent sur des analyses statiques (posture initiale et finale) principalement pour des activités de manutention : lever, déposer, pousser et tirer. Des charges différentes peuvent être appliquées pour chaque main	À partir d'études connues Porter (1998) Grandjean (1980) Pebiffe (1969) Dreyfus 2D et 3D Les résultats sont présentés sous forme de graphique pyramidal et le concepteur peut évaluer si les segments sont à l'intérieur de la zone de confort	L'équation de levage révisée de NIOSH 1991 Module d'animation simple pour le déplacement du mannequin Le menu 3DSSPP permet à l'utilisateur de produire des rapports biomécaniques par segment (Masse, volume, position x,y,z, Centre de masse, force et moment) et un sommaire (rotation x,y,z, forces et moments pour l'ensemble des joints) Les concepteurs peuvent également comparer le torque d'un segment entre deux mannequins

5.4.5.2 La cinématique directe

La cinématique demande un déplacement individuel pour l'ensemble des segments selon une hiérarchie spécifique à chaque posture (Fig. 5.10). À titre d'exemple, pour générer une posture liée à la conduite d'un véhicule industriel, il serait préférable de positionner le tronc ainsi que les jambes puis les épaules, les bras, les avant-bras, les mains et enfin les doigts. Un travail qui peut s'avérer fastidieux sur le plan temporel compte tenu des nombreux degrés de liberté offerts. Certaines fonctions sont offertes pour faciliter la tâche comme le positionnement miroir pour les segments des bras et des jambes (Tab. 5.4).



Figure 5.10 : Limites articulaires pour Catia

5.4.5.3 La cinématique inverse

La cinématique inverse est basée sur le respect de contraintes angulaires d'articulations spécifiques d'un mannequin. Cette fonction permet de définir automatiquement, à l'aide d'un algorithme mathématique, une posture en fonction de la préhension d'un objet ou d'une cible. Par exemple, l'utilisateur peut déplacer uniquement la ou les mains d'un mannequin pour atteindre un organe de contrôle et établir automatiquement l'orientation de l'ensemble des segments du corps en fonction de ce déplacement. CATIA et NX offrent pour cette fonction, différentes méthodes (Tab. 5.4). ManneQuinELITE n'offre pas la fonction de la cinématique inverse, mais elle sera disponible dans la prochaine version HumanCAD 1.0, la nouvelle génération du logiciel humanoïde de Nexgen.

L'utilisation de la cinématique inverse ne se fait pas sans difficulté. Après plusieurs tentatives infructueuses, nous n'avons toujours pas réussi à générer les postures désirées. Cette fonction demande une formation spécifique ainsi que des connaissances au niveau de la biomécanique humaine. Pour arriver à établir des postures naturelles et logiques, il faut préalablement fixer le comportement du corps en fonction de contraintes liées au mouvement naturel des différentes régions anatomiques (Tab. 5.4). Les relations entre les contraintes peuvent être nombreuses et difficiles à établir en fonction du résultat escompté. Si certaines contraintes et/ou certains segments sont laissés libres, la posture risque d'être difficile à contrôler et partir dans tous les sens. De plus, cette méthode ne permet pas de positionner les segments avec une grande précision. Le concepteur devra par la suite procéder à des ajustements manuellement à l'aide de la cinématique directe.

5.4.5.4 Analyse des zones d'atteinte

Les trois logiciels permettent de présenter visuellement les zones d'atteinte à l'aide d'un volume de préhension. La figure 5.11 montre la zone d'atteinte pour la main droite pour une posture statique. De plus, NX offre la possibilité de réaliser des analyses de confort, selon 5 différentes études (Tab. 5.4). Les analyses permettent au concepteur de déterminer si les segments à l'étude sont dans la zone de confort.

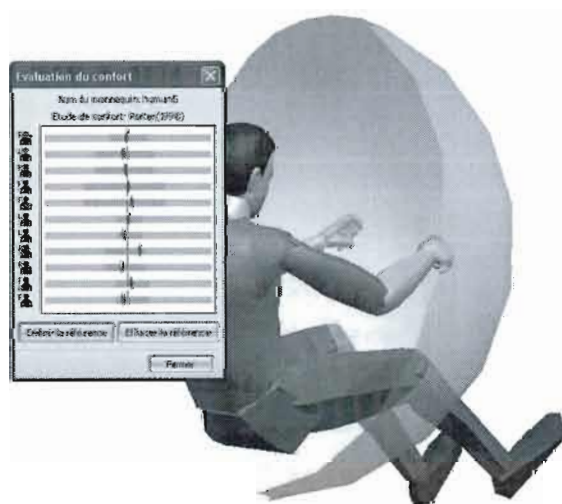


Figure 5.11 : Zone d'atteinte et analyse du confort dans NX (posture de conduite automobile)

CATIA et ManneQuinELITE offrent un module très spécialisé sur l'analyse de l'activité (Tab. 5.4). Les outils offerts se concentrent sur des analyses statiques (posture initiale et finale) principalement pour des activités de manutention : lever, déposer, pousser et tirer. Différentes méthodes et outils sont employés afin d'assurer une certaine conformité à différentes normes et pour maximiser la sécurité ainsi que le confort de l'opérateur. Cependant, ces outils s'inscrivent davantage au niveau des connaissances et compétences d'un ergonome ou d'un ingénieur industriel.

5.4.6 LA VISION

La vision est un élément très important à prendre en considération lors du dimensionnement des objets, notamment pour déterminer l'emplacement des montants du châssis afin de réduire les zones de masquage et pour optimiser l'emplacement des organes de commande et des cadrans. Les logiciels permettent à l'utilisateur de réaliser des analyses de visibilité soit par la création de cônes visuels ou de se transposer dans l'œil du mannequin (Fig. 5.12).



Figure 5.12 : Simulation sur Catia du champ visuel pour un conducteur d'un chariot élévateur

Différentes manipulations ont mis en évidence que l'utilisation de cette fonction demande préalablement aux concepteurs de connaître les principes qui régissent le champ de vision. À titre d'exemple, CATIA offre 5 types de champs visuels : binoculaire, ambinoculaire, monoculaire droit, gauche et en stéréo. Le concepteur a la liberté de déterminer plusieurs paramètres pour l'ensemble des champs visuels: angle horizontal

monoculaire et ambinoculaire¹⁸, l'angle vertical supérieur, inférieur et central, puis le *punctum remotum*¹⁹, le *punctum proximum*²⁰ ainsi que la distance focale²¹. Cependant, il est important de préciser qu'aucune information n'est disponible pour aider le concepteur à modifier ces paramètres en lien avec les différents champs de vision offerts. Après avoir sélectionné les valeurs maximales pour une vision ambinoculaire, il nous a été impossible d'obtenir de résultat. De plus, les valeurs par défaut ne sont établies qu'à partir des caractéristiques d'un individu sans amétropies. Nous n'avons pas été en mesure d'explorer cette option pour NX, car celle-ci n'est pas disponible dans la solution de base.

5.5 COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES DES LOGICIELS ANTHROPOMÉTRIQUES ET LES ENQUÊTES CAESAR

Dans cette section, nous présentons les écarts entre différentes variables offertes dans les trois logiciels et ceux de l'enquête CAESAR (1998-2000). Nous présentons également les écarts entre les variables du logiciel CATIA et ceux de l'enquête ANSUR (1988). Rappelons que l'origine de la base de données utilisée par CATIA n'est pas connue et que contrairement à CATIA, le logiciel NX offre par défaut deux enquêtes : ANSUR 1988 et NHANES (Tab. 5.5). Précisons que nous n'avons pas été en mesure d'établir les écarts pour la majorité des mesures offertes par ManneQuinELITE, car ceux-ci ne suivent pas l'appellation standard ISO.

¹⁸ Par la vision ambinoculaire, on désigne la totalité du champ de vision obtenu par l'addition des champs monoculaires de l'œil droit et de l'œil gauche. Alors que la vision binoculaire est obtenue uniquement par la superposition des champs monoculaires des deux yeux.

¹⁹ Le *punctum remotum* correspond au point le plus éloigné que l'œil peut voir nettement quand il est au repos.

²⁰ Le *punctum proximum* correspond au point le plus proche que l'œil peut voir nettement.

²¹ La distance focale, est la distance entre le *punctum remotum* et le *punctum proximum*. Elle permet de connaître l'accommodation maximale d'un sujet.

Tout comme les précédentes comparaisons, le tableau 5.5 montre un manque de cohérence entre l'offre des différents logiciels. La présence et l'absence d'écart met en évidence que les trois logiciels tirent leurs données d'enquêtes civiles ou militaires qui datent. Plusieurs observations nous permettent d'établir ce constat : i) on observe des écarts pour l'ensemble des données du 95e centile au niveau de la stature et du poids ; ii) nous pouvons également observer sensiblement les mêmes écarts importants au niveau des circonférences de la poitrine (105 mm), de l'abdomen (110 mm) et des hanches (108 mm) que ceux établis entre les données de CAESAR et ANSUR (cf. Tableau 4.5). iii) les écarts entre, la hauteur du buste et la hauteur des yeux en posture assise, nous permet également d'affirmer que NX base ses données civiles d'une enquête NHANES qui date ; iv) de plus, les écarts négligeables entre les données de CATIA et ceux de ANSUR, nous amènent à croire que la seule base de données offertes par défaut pour CATIA tire ses données de cette enquête militaire. Nous pouvons également observer différents écarts pour les données de CATIA et de NX, bien que tous les deux tirent leurs données d'ANSUR. Cela laisse croire que NX utilise des calculs mathématiques différents pour générer leurs représentations.

Tableau 5.5 : Écarts entre certaines variables des logiciels et ceux de l'enquête CAESAR 1998-2000, puis les écarts entre les mêmes variables pour CATIA et l'enquête ANSUR (1988)

Hommes 5e, 50e et 95e centile	Enquêtes Civiles			Logiciels anthropométriques												Écart entre CATIA et ANSUR 1988		
	CAESAR 1998-2000			Catia / Safework			NX / ANSUR			NX / NHANES			ManneQuinELITE					
	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
Mesures sont en mm																		
Posture debout																		
Poids (Kg)	63	80	115	3	1	18	1	2	17	5	1	3	1	2	17	1	0	1
Stature	1650	1759	1901	4	3	35	3	4	34	29	19	33	3	4	34	1	-1	1
Circonférence de la tête	551	576	604															
Distance fonctionnelle d'atteinte antérieure des membres supérieurs	745	804	878	-1	4	13										3	-1	2
Largeur des épaules	440	486	550	-18	-6	16	-16	15	65	-24	0	33				1	0	0
Circonférence de la poitrine	884	1008	1210	-20	16	105										8	-5	8
Circonférence de l'abdomen	746	872	1114	-13	10	110										12	-7	11
Circonférence des hanches	918	1018	1194	22	34	108										5	-3	4
Largeur des hanches																1	-1	1
Bi-Trochantic (distance maximale du massif fessier)	322	361	412															
Hauteur de la jambe	719	796	880	-59	-42	-33										3	-2	3
Posture assis																		
Hauteur du buste (hauteur assise)	856	919	985	-13	5	13	9	25	42	20	32	43				-1	0	-1
Hauteur des yeux	739	801	867	-11	9	19	11	29	48	22	36	49				-1	0	0
Longueur du bras																1	0	0
Longueur de l'avant-bras																2	-1	2
Largeur au bassin	329	372	435	-3	5	27										3	-2	3
Bi-Trochantic (distance maximale du massif fessier)	339	380	442															
Longueur de la cuisse (fesses- genou)	562	610	673	-9	-6	7	-14	-9	4	-2	-7	-10				2	-1	2
Hauteur de la jambe (genou-sol)	513	556	607	-3	-3	2	-22	-21	-15	-5	-8	-9				1	-1	1

5.6 SYNTHÈSE

Le domaine est en pleine effervescence, plusieurs groupes de recherche travaillent à l'amélioration des représentations digitales humaines. Les trois logiciels (CATIA V5 R16, NX 6 et ManneQuinELITE) offrent des dispositifs intéressants pour mieux apprécier les volumes occupés par les utilisateurs. Il est possible pour les concepteurs de créer différents mannequins petits et grands, de définir les zones d'atteintes, de simuler des angles de vision et d'évaluer sommairement le confort. Les logiciels de CAO, comme CATIA et NX, ont l'avantage de permettre d'incorporer les représentations dans l'environnement natif de CAO, cependant leurs modules anthropométriques demandent un investissement considérable (cf. Tableau 3.2). En contrepartie, plus abordables, les logiciels d'ergonomie autonome comme ManneQuinELITE obligent les concepteurs à faire des allers-retours entre le logiciel de CAO et le logiciel d'ergonomie (Blanchonette, 2006). Pour faciliter le processus de migration, les concepteurs doivent fragmenter les gros fichiers et les incorporer à tour de rôle pour les ressembler par la suite dans le logiciel d'analyse ergonomique, ce qui impose une gestion lourde des fichiers avec risque de perdre des données ou d'avoir de la difficulté à assembler les différentes composantes ou parties du produits.

L'analyse met en évidence que des efforts doivent être faits pour arriver à développer des représentations plus fidèles à la réalité comme les représentations numérisées en 3D de CAESAR (cf. chapitre 3) ou ceux des logiciels de POSER ou 3ds Max qui peuvent dynamiser les présentations aux clients. La manipulation au niveau de la distribution de la masse grasseuse montre de façon éloquent que les logiciels n'offrent pas la possibilité de générer des représentations digitales humaines avec des morphologies variées. La distribution de la masse grasseuse se fait selon un seul modèle mathématique. CATIA est le seul logiciel qui permet de générer des représentations souffrant d'obésité androïde. Les logiciels n'offrent pas un large éventail de mannequins prêts à l'utilisation et qui tiennent compte des paramètres biométriques comme l'état de santé, l'âge, la morphologie, l'origine ethnique, etc. La construction de représentations peut se faire difficilement et uniquement en fonction du sexe et des centiles. Dans le cas de la conception d'un hélicoptère, Pinto et Taneja (op.cit.) ont montré l'importance de prendre en considération les vêtements, les accessoires ainsi que la compressibilité des tissus gras. L'absence de ces facteurs

influence l'emplacement des organes de commande. Les designers peuvent difficilement concevoir un produit qui s'adresse à un segment de marché précis.

Malgré plusieurs heures d'utilisation, nous n'avons pas réussi à faire adopter aux mannequins des postures spécifiques avec la cinématique inversée. La cinématique directe est plus intuitive, mais elle demande un investissement colossal. De plus, ces outils ne permettent pas d'établir le volume occupé après un ou plusieurs mouvements. Les représentations sont statiques. Les composantes anatomiques (nombre de segments, nombre d'articulations et le nombre de degrés de liberté) varient d'un logiciel à l'autre. Les mouvements sont tous fondés sur des principes empruntés à la robotique, la reproduction de mouvements est moins fluide que ceux du corps humain. Suite à l'analyse et à la mise en évidence de plusieurs incohérences et limites et l'élaboration de manipulations complexes, il est impératif de formuler des critères de conception pour améliorer les outils existants ou pour concevoir des outils mieux adaptés au travail des designers. Ces outils demandent à la fois des connaissances et des compétences liées à la conception de produits et des aspects liés à l'ergonomie.

Pour terminer, les logiciels tirent leurs sources anthropométriques d'enquêtes militaires ou civiles qui datent. Tout comme pour la majorité des ouvrages anthropométriques, il n'y a pas de cohérence au niveau des données et on observe des écarts variés entre les données des trois logiciels et ceux de l'enquête CAESAR.

CHAPITRE VI

SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Une enquête québécoise souligne que les designers industriels interrogés estiment avoir reçu une formation qui légitime leur capacité de penser toutes les facettes du produit incluant la capacité d'intégrer le point de vue de l'utilisateur (Trépanier, 2007). Les clients semblent avoir la même perception, selon une importante enquête visant 1 002 entreprises québécoises (Abdel-Malak et Brassard, 2008). En plus d'améliorer l'image du produit, de permettre l'innovation, d'augmenter la chance de succès d'un produit et de maintenir son avance sur la compétition, les répondants indiquent que les designers industriels auraient également comme utilité d'améliorer l'ergonomie et l'adaptation à l'usage. Étant donné le nombre d'utilisateurs qui éprouvent des inconforts au niveau de différents types de produits et de la responsabilité qui incombe aux designers industriels de considérer les caractéristiques anthropométriques des futurs utilisateurs, notre travail s'est intéressé à l'offre anthropométrique et à la cohérence des principaux ouvrages disponibles pour aider les concepteurs à dimensionner les produits qu'ils conçoivent. Peut-on conseiller les principaux ouvrages en toute confiance aux designers et penser qu'ils dimensionneront convenablement leurs concepts avec ces outils ? Les formats de présentation des données facilitent-ils la prise de décision en matière de dimensionnement ?

Dans ce mémoire, nous montrons que le choix de l'ouvrage et du logiciel anthropométrique pourraient amener les designers industriels à prendre de mauvaises décisions sur le plan dimensionnel de l'objet. Les représentations offertes ne sont pas construites à partir de données actuelles. Plusieurs segments ont subi des changements. Nous montrons également que les abaques et logiciels avec module anthropométrique ne

permettent pas de générer des mannequins avec des morphologies variées que l'on retrouve dans les populations d'aujourd'hui. Les designers peuvent donc difficilement utiliser ou construire des représentations susceptibles de prendre en considération un nombre appréciable d'utilisateurs ciblés.

Ce chapitre a pour objectif de discuter de la cohérence des outils mis à la disposition des designers industriels pour dimensionner convenablement les produits et d'établir les avantages ainsi que les limites des outils offerts. Nous discutons des incohérences de l'offre, des problèmes liés à la compilation et aux formats de présentation des données. Nous montrons les avantages ainsi que les limites que peuvent présenter l'utilisation des représentations digitales humaines. Nous présentons également quelques mises en garde et suggestions lors du dimensionnement de certains produits. Pour terminer, nous présentons les limites liées à la recherche, puis différents axes de recherches complémentaires à développer dans le but d'élaborer les principaux critères de conception d'outils et représentations humaines numériques en meilleure adéquation avec l'activité des designers industriels. Ces outils permettront de faire, dès la conception, des simulations plus performantes, surtout avec des représentations plus réalistes et précises.

6.1 DES ÉCARTS IMPORTANTS ENTRE LES DIFFÉRENTES SOURCES

Les populations connaissent des changements morphologiques sans précédent. À l'heure actuelle, l'obésité et l'immigration sont deux facteurs qui contribuent à ces changements. La comparaison que nous avons réalisée entre deux enquêtes civiles nord-américaines présentant un intervalle de 42 ans, montre que les écarts sont en bonne partie attribuables aux segments associés à l'obésité (poids, largeur des épaules, les circonférences de la poitrine, de l'abdomen et des hanches, la largeur au bassin et la longueur de la cuisse). Le fait que les civils possèdent de plus petites jambes que les militaires pourrait s'expliquer par l'arrivée massive d'Hispaniques plus trapus et/ou par la forte présence de soldats Afro-Américains possédant généralement de plus longues jambes. Nos résultats confirment également les travaux de Stoudt (1979) sur l'évolution de la stature de la population Nord-

Américaine, qui représente près de 10 mm par décennie. Selon nos calculs, sur un intervalle de 40 ans les civils Nord-Américains ont grandi de près de 37 mm pour les hommes et de 40 mm pour les femmes.

Notre recherche met en évidence que les designers industriels disposent de très peu d'ouvrages actualisés. L'enquête civile CASEAR est la plus récente enquête réalisée auprès de civils, alors que les abaques — outils privilégiés des designers — et les logiciels datent et/ou tirent leurs sources d'enquêtes militaires. Comment peut-on penser que les designers seront en mesure d'établir les justes dimensions des sièges et l'habitacle d'un avion pour les passagers ? On a vu que l'utilisation du 95e centile femme militaire pour établir la largeur d'un siège pour avion peut faire en sorte d'exclure 30% de la population civile qui est plus corpulente. Rien de très surprenant, car d'emblée les individus que l'on recrute ou qui s'engagent correspondent à des critères spécifiques, c'est-à-dire jeunes, en santé et en bonne condition physique, voir même athlétique. À l'inverse, il ne serait pas approprié d'utiliser des données civiles pour dimensionner un véhicule destiné à des militaires, car les jambes de ceux-ci sont en moyenne plus longues de 40 mm que celles des civils. L'ensemble des écarts observés dans cette étude mettent en évidence que le choix des enquêtes ou abaques, voire même les logiciels avec module anthropométrique, peuvent influencer considérablement le dimensionnement d'un objet. Les designers et les fabricants d'outils d'aide à la conception doivent réfléchir à la nécessité de prendre en compte certains facteurs qui changent le volume occupé par les individus.

Les designers ont besoin d'établir les dimensions d'un produit en fonction de facteurs de variations (l'âge, l'origine ethnique, la posture, le port de vêtements, le corps de métier, les variations au niveau du caractère régional des données, etc.) qui changent le volume occupé par les individus. À titre d'exemple, les données chez les personnes du 3e et 4e âge sont pratiquement inexistantes, ce qui peut favoriser l'exclusion de certaines caractéristiques biométriques appartenant à ces groupes d'individus. De plus, les données ne sont pas compilées en fonction des caractéristiques biométriques pouvant appartenir à différents utilisateurs ciblés (marchés cibles). Par exemple, en marketing, le marché peut être divisé en différentes unités géographiques ou plus populaires par la segmentation démographique,

c'est-à-dire en fonction de l'âge, du sexe, l'occupation, l'ethnie, la nationalité. Les données anthropométriques offertes ne permettent pas de faire de telles catégorisations.

6.2 L'AVANTAGE DES REPRÉSENTATIONS 3D

Bien que l'enquête CASEAR présente des données plus actuelles, son format de présentation, c'est-à-dire des données présentées individuellement dans des tableaux, sont plus ou moins abstraites. Le format permet difficilement la construction de représentations complètes, voilà pourquoi les représentations humaines en 2D offertes dans les abaques et/ou 3D par les logiciels répondent davantage à l'activité des designers. Les représentations 2D offertes par les abaques s'adaptent aux formats des esquisses en 2D élaborées en amont de la conception. Les simulations virtuelles représentent une piste prometteuse, surtout pour les projets impliquant des mesures de sécurité et/ou d'envergure dont le coût associé aux maquettes et prototypes est considérable. Contrairement aux représentations uniquement en 2D offertes dans les abaques, les représentations digitales humaines (RDH) en 3D permettent également une réelle prise en compte du volume occupé par un individu. Les RDH sont également articulés avec une grande précision, il est donc possible pour les concepteurs de reproduire des postures contextualisées et de générer des mesures fonctionnelles. Les RDH intégrés aux logiciels de CAO paramétriques, permettent avantageusement de déterminer, par exemple, l'emplacement d'organes de commande dans un plan tridimensionnel (x,y,z). Les simulations peuvent être conduites en amont du projet et dans l'environnement natif du logiciel de CAO possédant un module anthropométrique. Ces représentations doivent être accessibles tout au long du processus du développement d'un produit, c'est-à-dire des premières esquisses jusqu'à l'élaboration des designs pour la fabrication. Cependant, à l'heure actuelle, certains facteurs peuvent limiter l'accès à de tels logiciels : leur coût élevé, le temps fécond d'apprentissage du logiciel ainsi que les difficultés liées à la manipulation des représentations.

Au-delà des caractéristiques propres à la mesure dynamique qui représente en soi un défi de taille, il faut s'assurer de la cohérence de la mesure statique. Au niveau de la mesure du corps humain, il ne peut y avoir de précision sans réalisme. Ce qui donne la richesse de la mesure, c'est la précision, du moins une conformité acceptable et non grossière. Nos

manipulations nous ont permis de constater que les abaques et les logiciels offrent des représentations grossières. La structure anatomique des trois logiciels analysés est trop loin de celle de l'Homme. Les simulations recherchent une précision qui est liée initialement à la reproduction du réel et l'introduction de mannequins numériques dans ces modèles impose des particularités dimensionnelles de l'Homme de façon tout aussi précise. En accord avec cette orientation technologique, il serait souhaitable d'offrir des représentations 3D articulées et possédant le niveau de réalisme suffisant pour permettre un dimensionnement précis. Les représentations anatomiques construites à partir de couches anatomiques successives permettraient la prise en compte des mouvements réellement déployés dans l'usage par les différents types d'utilisateurs (enfants, adolescents, adultes, aînés, handicapés,...) avec des mouvements définis selon les capacités physiques, les habitudes, les stratégies et conduites à partir des dimensions corporelles entourant les muscles, les graisses, les tissus sous-cutanés, la peau, les articulations des individus ainsi que les vêtements. Pour terminer, des nouvelles approches doivent être proposées comme la stéréovidéo, la numérisation, ou les capteurs de mouvements (motion capture ou mocap) permettant de reproduire plus rapidement les différentes postures adoptées par les utilisateurs. Troy et Guérin (2004) ont montré l'avantage de réaliser des simulations offrant le volume occupé par la somme des mouvements d'un individu.

6.3 CERTAINS FORMATS DE PRÉSENTATION FAVORISENT LES ERREURS

Nos recherches ainsi que nos manipulations nous ont permis de mettre en lumière que certains formats de présentation sont directement associés à des erreurs au niveau de l'interprétation des données. À titre d'exemple, il existe plusieurs limites associées à l'utilisation de la méthode frontière comme le 5e centile femme et le 95e centile homme largement utilisée par les designers industriels. Les tables et des représentations en 2D ne reflétant pas la nature multivariante des utilisateurs, les concepteurs ne peuvent pas prendre en considération plus d'un segment. Certains chercheurs proposent des alternatives à l'utilisation des centiles comme l'utilisation de "l'Ellipse" qui permet l'analyse de deux variables alors que "l'Ellipsoïde" (analyse sous forme de ballon de football) permet la prise en compte des multivariations pour trois segments (Molenbroek, 2005; Roebuck, 1995; Robinette et McConville, 1982; Dainoff et al, 2004). Cependant, ces méthodes exigent de la

part des designers de disposer de données brutes pour que les logiciels puissent faire les calculs. Ces outils demeurent hors de portée pour la plupart des designers industriels. Cela traduit bien la limite de modèles comme celui de Molenbroek présenté au chapitre 1. De plus, plusieurs objets imposent la prise en compte de plusieurs données, cela pose un réel problème compte tenu des limites au niveau du nombre de variables à traiter par les méthodes proposées. La prise en compte de 4 variables ou plus devient difficile, voire impossible (Dainoff et al. 2003).

6.4 DIMENSIONNER EN FONCTION DE LA POPULATION ET DES MESURES LES PLUS IMPORTANTES

Compte tenu des limites associées aux formats de présentation des données, quelles sont les solutions que nous pouvons offrir aux designers industriels ? Nous présentons dans le tableau 6.1, certaines mises en garde en fonction de différents paramètres.

Tableau 6.1 : Facteurs à prendre en considération

Population	Paramètres biométriques	Enquête suggérée
Personnes âgées	Affaisssement de la colonne vertébrale. Diminution de la hauteur du buste et des yeux en position assise. Réduction des amplitudes articulaires	NHANES III
Personnes obèses	Volume occupé Réduction des amplitudes articulaires	CAESAR
Personne (18-65)		CAESAR

Les premiers facteurs à prendre en considération lors du dimensionnement, sont la population et/ou le marché visé (enfants, adultes et/ou personnes âgées). Selon le groupe d'âge, certains paramètres biométriques doivent être pris en considération. À titre d'exemple, en plus de la réduction des amplitudes articulaires, la hauteur du buste et des yeux en position assise pour une personne âgée est considérablement réduite par l'affaisssement de la colonne

vertébrale. L'obésité qui a augmenté pour chaque groupe d'âge au Canada, à l'exception de celui des 65 à 74 ans, change le volume occupé par l'individu et aussi les réductions des amplitudes articulaires.

Pour établir les dimensions d'une station de travail, Das (1996) identifie 4 mesures importantes : i) la hauteur du plan de travail ; ii) les zones d'atteinte normales et maximales ; iii) le dégagement latérale ; iv) et l'angle de vision et la hauteur des yeux. Plusieurs autres produits impliquent la prise en considération de plusieurs mesures comme la conception d'un véhicule automobile, d'un casque de protection, d'un gant de hockey, etc. Une fois que le designer a bien identifié la population et ces paramètres biométriques distinctifs, il est important d'identifier les mesures importantes à prendre en considération. Car, plus il y a de variables à prendre en considération, plus il y aura de variations (cf. section 6.3). Une fois le nombre de variations identifiées, il est possible à l'aide des représentations digitales humaines de générer différents mannequins qui peuvent tenir compte des multiples variations. À titre d'exemple, déterminer les plages d'ajustement d'un siège pour la conduite d'un véhicule, la triade "hauteur des yeux assis — longueur des bras — des jambes" est importante. La prise en considération de trois variables peut nous permettre d'utiliser "l'Ellipsoid". Cependant si le concepteur ne dispose pas des données brutes d'une enquête, il est toujours possible de construire huit (8) mannequins différents présentés au tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Mannequins représentant les multiples variances pour trois mesures

	Longueur de bras	Longueur de jambe	Hauteur d'yeux
1	Longue	Longue	Longue
2	Courte	Courte	Courte
3	Longue	Longue	Courte
4	Courte	Courte	Longue
5	Longue	Courte	Courte
6	Courte	Longue	Longue
7	Longue	Courte	Longue
8	Courte	Longue	Courte

Il n'en demeure pas moins qu'aucun outil permet d'établir de façon optimale, voire réaliste, les mesures frontières pour certaines combinaisons. À titre d'exemple, quelle dimension donner à la longueur de bras et longueur de jambe à la représentation 4 (Tab. 6.2). Dans ce tableau, "courte" ne signifie pas la mesure du 2,5 ou 5 centile et "longue" ne correspond pas nécessairement à la mesure du 97,5 centile. Nous devons travailler à élaborer des outils ou méthodes permettant aux designers de générer des représentations frontières (personas) finement calculées et surtout près du réel. La présente offre anthropométrique ne peut permettre aux designers industriels d'établir des dimensions précises en amont du projet, dans le but d'inclure un pourcentage x d'utilisateurs. Qui plus est, les designers n'ont aucune idée du pourcentage d'utilisateurs réellement exclu tant en amont qu'en aval du processus de développement du produit. Cependant, cette méthode contribue à réduire le nombre d'individus exclus.

6.5 LIMITES ASSOCIÉES À LA RECHERCHE

Compte tenu du temps alloué pour la recherche, nous n'avons pas été en mesure d'analyser un nombre appréciable d'ouvrages. Notre analyse critique a été menée uniquement à partir d'ouvrages recommandés et utilisés dans les institutions d'enseignements québécoises offrant les programmes de design industriel et/ou de génie mécanique. De plus, le nombre restreint de segments communs relevés dans les enquêtes étant limité, nous n'avons pas été en mesure d'identifier l'évolution morphologique au niveau de l'ensemble des segments sélectionnés, surtout chez les civils. Compte tenu des budgets alloués nous n'avons pas été en mesure d'analyser le logiciel Santo, avec ces représentations plus réalistes et plus conformes au niveau de la structure anatomique humaine.

6.6 AXES DE RECHERCHE COMPLEMENTAIRE

6.6.1 L'activité des designers

La nature de notre travail montre à tout le moins qu'il est également important d'évaluer le niveau de précision recherché par les designers industriels. Selon, Jeantet et al. (1998), pour améliorer certains outils de conception, il faut chercher à mieux comprendre les

activités des concepteurs ainsi que les éléments qui structurent l'activité de conception dans le but d'identifier les besoins des concepteurs ; en ce qui nous concerne, celui des designers industriels. Il serait souhaitable de répondre à quelques questions fondamentales surtout en ce qui concerne l'activité du dimensionnement : quand le designer dimensionne-t-il l'objet ? Avec quelles données ? Comment dimensionne-t-il ? Pour qui ? À partir de cela nous pourrions mettre à la disposition du designer des outils qui lui permettent d'établir les dimensions appropriées aux utilisateurs des produits qu'il conçoit. L'amélioration des outils offerts aux designers industriels jouent un rôle prépondérant dans la satisfaction des besoins fondamentaux des utilisateurs. Il serait également pertinent d'identifier les activités, les outils ainsi que les objets intermédiaires de la conception qui sont liés à l'activité du dimensionnement. Ces axes pourraient aider à développer des outils de simulation dynamique 3D en meilleure adéquation avec l'activité des utilisateurs et le travail des designers industriels, c'est-à-dire des outils de simulation conviviaux permettant de reproduire rapidement des synergies de mouvements dans des environnements dynamiques simulés.

6.6.2 La précision lors de l'utilisation de la donnée

Les données entre les différents ouvrages présentent des écarts importants, allant de 1 mm à 236 mm (cf. chapitre 4). Nous devons chercher à identifier le niveau de précision acceptable. D'emblée, certains produits demandent d'atteindre une plus grande précision. C'est le cas notamment pour les instruments chirurgicaux et les masques respiratoires. Quels sont les facteurs qui influencent ou déterminent le niveau de précision exigé au niveau de la donnée ? Quelles sont les répercussions liées aux imprécisions ? En conception de produit, le confort et même le plaisir ne sont-ils pas intimement liés à la précision ?

6.6.3 L'innovation passe aussi par l'acquisition d'une bonne information

En accord avec les travaux de Duchamp (1988), l'approche produit doit être présente dans l'esprit des concepteurs responsables de l'innovation dans l'entreprise. Faire un bon produit oblige les concepteurs à saisir le détail, les éléments susceptibles d'augmenter la satisfaction des utilisateurs. La réussite du processus et du résultat final dépend de la qualité

de l'information qui est utilisée et produite (Chengalur-Smith, 1999). Cependant, la pertinence de l'information est un état dynamique qui dépend de la perception du concepteur (Schamber et al., 1990). L'information sera recherchée si sa valeur perçue est plus grande que le coût perçu pour l'obtenir (Rouse et al., 2002). De plus, acquérir et produire cette information à partir de plusieurs sources (le client, les partenaires, le contexte lié au projet) est inévitablement limitée par des courts délais. Cela met en évidence qu'il faut chercher à diminuer le coût pour obtenir l'information. Les populations connaissent des transformations morphologiques sans précédent, cela oblige la tenue d'enquêtes à intervalles plus rapprochées pour permettre la prise en compte de ces transformations. Cependant, les enquêtes sont le fruit de différentes études très coûteuses à produire, donc très orientées en fonction des bailleurs de fond, ce qui limite les possibilités d'avoir un "tout" très complet. Des efforts doivent être faits pour arriver à proposer, à un coût raisonnable, des données actuelles et des représentations suffisamment réalistes. Les projets doivent être conduits selon une préoccupation sociale. Cela met en évidence la nécessité de partager les efforts au niveau international. Les initiatives internationales comme World Engineering Anthropometry Resource (WEAR) favorisant activement la diffusion et le développement de connaissances dans les domaines de l'anthropométrie et de l'ergonomie afin de contribuer à l'amélioration de la santé, de la sûreté et du bien-être des personnes (Veitch et Robinette, 2006) doivent être encouragées. Actuellement WEAR a rassemblé et évalué 145 bases de données, en 1D, 2D et 3D auxquelles ont été appliquées des directives strictes de garantie de qualité.

6.7 CONCLUSION GENERALE

1. Alors qu'on se préoccupe depuis longtemps des dimensions corporelles de l'Homme, l'étude montre que cette passion risque de se prolonger notamment avec l'évolution morphologique des humains et l'arrivée de nouvelles technologies informatiques.
2. Tout n'est pas fait en anthropométrie. En effet la biométrie qui inscrit l'ensemble des caractéristiques mesurables offre l'avantage de présenter de nouvelles caractéristiques liées à l'état de santé qui peuvent influencer le volume occupé par les différents utilisateurs.

3. La conception de produits demande une prise en compte d'un ensemble d'individus très variable au niveau de tous les points de vue, c'est-à-dire la prise en compte de l'ensemble de leurs caractéristiques mesurables y compris les différents emplacements des joints et autres marqueurs anatomiques et non uniquement leur longueur ainsi que leur volume.
4. À l'heure actuelle, les designers ne disposent pas de représentations humaines en 2D ou en 3D, qui permettent la prise en compte de différentes morphologies et les limites articulaires qui y sont associées. Les données ne sont pas compilées de façon à faciliter la construction d'un groupe de représentations humaines en fonction de différents paramètres biométriques appartenant à un marché ciblé.
5. Les représentations digitales humaines (RDH) associées aux logiciels de CAO représentent une piste prometteuse pour réaliser des simulations en amont des projets. Ces logiciels ont l'avantage de permettre la construction de différentes représentations en fonction de postures contextualisées dans l'environnement natif de CAO. Cependant, les paramètres de construction sont limités au sexe et aux données anthropométriques.
6. Les fabricants de ces logiciels doivent offrir des représentations humaines prêtes à être utilisées et des outils de gestion permettant la construction de représentations humaines selon différents paramètres biométriques comme l'âge, l'origine ethnique, la morphologie, le port de vêtement, les variations séculaires, le corps de métier, les variations au niveau du caractère régional des données, etc. Plusieurs efforts doivent être également menés de front pour en arriver à des représentations prêtes à être utilisées, plus réalistes et capables de mouvements fluides rapidement reproductibles.

APPENDICE A

REPERTOIRE DES BASES DE DONNEES OU OUVRAGES NORD-AMERICAINS
TRAITANT DES DONNEES ANTHROPOMETRIQUES

Ouvrages	Auteurs
Enquêtes civiles	
NHES I: Weight, Height, and Selected Body Dimensions of Adults, United States — 1960-1962	Stoudt, (1965)
NHES II: National Health Examination Survey II — 1963-65	
NHES III: National Health Examination Survey III — 1966-70	
NHANES I: National Health and Nutrition Examination Survey I — 1971-75	
NHANES II: National Health and Nutrition Examination Survey II — 1976-80	
HHANES: Hispanic Health and Nutrition Examination Survey — 1982-84	
NHANES III:	
Continuous NHANES: National Health and Nutrition Examination Survey — 1999-présent	
CAESAR : Summary statistics for the adult population (ages 18-65) of the United States of America	Harrison, (2002)
Enquêtes militaires	
CWS Face Study — 1945	DOD-HDBK-743 Military Handbook Anthropometry of USA Military Personnel
Ft. Knox Foot Study — 1946	
US Army Men — 1946	
USAF Flying Personnel — 1950	
US Navy Aviators — 1964	
USAF Basic Trainees — 1965	
USAF Basic Trainees — 1966	
US Navy Recruits — 1966	
US Army Men — 1966	
US Marine Corps — 1966	
USAF Flying Personnel — 1967	
US Army Aviators — 1970	
Military Handbook Anthropometry of U.S. Military Personnel 1988 U.S. Army Men (ANSUR)	Gordon, (1989)
U.S. Women's Army Corps — 1946	DOD-HDBK-743 Military Handbook Anthropometry of USA Military Personnel
USAF WAF Trainees — 1952	
USAF Women — 1968	
US Army Women — 1977	
US Army Women — 1988	Gordon, (1989)
Enquêtes auprès d'enfants	
Child Anthropometry for Restraint System Design	Weber et al. (1985)
Anthropometry and shape of children's heads, necks, and shoulders for product safety design.	Schneider et al. (1985)
Anthropometry of infants, children and youths to Age 18 for product safety	Snyder et al. (1977)
Strength characteristics of U.S. children for product safety design	Owings et al. (1975)
Physical Characteristics of children As Related to Death and Injury A for Consumer Product Design and Use	Snyder et al. (1975)

Abaques	
The measure of man and woman: human factors in design	Tilley, (1993)
Human scale 1/2/3/4/5/6/7/8/9	Diffrient et <i>al.</i> (1981)
Human Dimension & Interior space	Panero et Zelnik, (1979)
Bodyspace	Pheasant et Haslegrave, (2006)
Human Factors in design handbook : Information and guidelines for the design systems, facilities, equipment and products for human use	Woodson, (1964)
Ergonomics	Kroemer et al. (1997)
Représentations digitales d'humains	
CATIA R16	Dassault system
NX 6	Siemens
Jack	
ManneQuinElite V10.0	NexGen Ergonomics
ManneQuinPro	
HumanCAD	
Santo	The University of Iowa VSR Team

APPENDICE B

COMMENT LES CHERCHEURS COMPTABILISENT LES DONNÉES SUR LE PLAN STATISTIQUE

NOTIONS STATISTIQUES

L'anthropométrie fait appel à la statistique descriptive, qui a pour but de synthétiser l'information contenue dans les données. Les enquêtes anthropométriques sont opérées généralement de la façon suivante : les chercheurs établissent d'abord un échantillon, à partir d'une population X (civile ou militaire). L'échantillon est donc constitué d'un sous-ensemble de la population, chacun des individus est appelé « unité statistique ». À partir, de toutes les unités statistiques, différentes variables statistiques (segments du corps) seront mesurées (Fig. A). L'échantillon est probabiliste quand les unités statistiques sont tirées au hasard selon une méthode reconnue qui permet d'assurer la représentativité de l'échantillon par rapport à la population totale. Comment calculer la taille d'un échantillon lors d'une enquête probabiliste? Cela dépend de la marge d'erreur acceptable et du degré de certitude que le chercheur désire et dans une certaine mesure, plus la population est importante, plus on a besoin d'un échantillon de plus grande taille (Statistique Canada, 2007)²².

Population

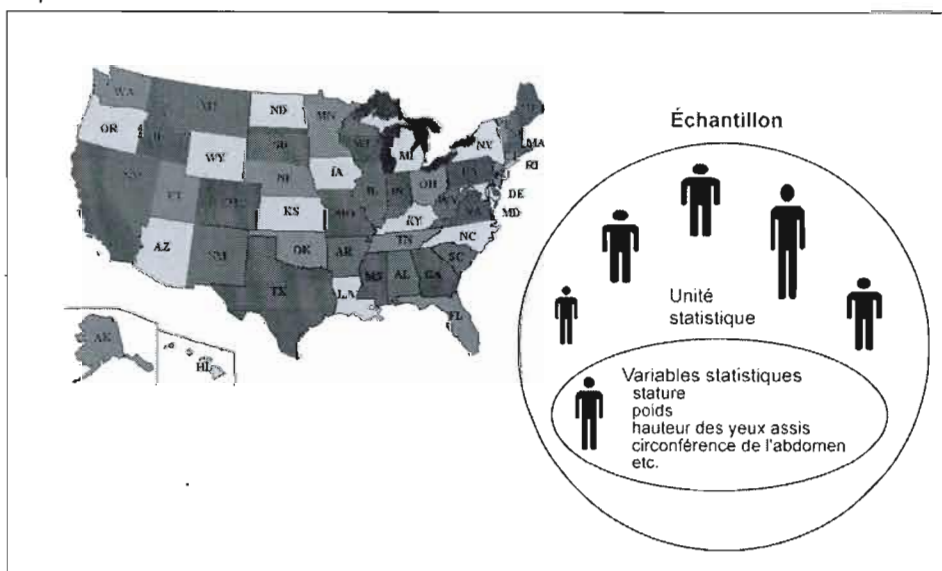


Figure A : Plan d'échantillonnage

²² (Site web : http://www.statcan.ca/francais/edu/power/ch13/sample/sample_f.htm, dernier accès : août 2009)

COMMENT LES CHERCHEURS COMPTABILISENT LES DONNEES UTILISEES PAR LES DESIGNERS INDUSTRIELS

L'ensemble des valeurs de la variable statistique étudiée doit être rangé dans un ordre croissant. Par la suite, les valeurs sont classées dans différentes classes, intervalles compris entre deux valeurs limites. Le centre d'une classe correspond au point milieu entre la borne inférieure et supérieure. Le nombre de classes ainsi que leur longueur de même valeur peuvent être établis à l'aide de formules mathématiques. Pour illustrer les efforts du traitement des données, nous avons réalisé la simulation suivante : une enquête anthropométrique réalisée auprès de 2 294 individus (unités statistiques), sur lesquelles différentes mesures ont été prélevées. Généralement en anthropométrie, les données sont d'abord traitées séparément selon le sexe des individus. Aux fins de cette démonstration, nous traiterons uniquement les données concernant la circonférence de la poitrine chez les hommes qui représentent 50% de l'échantillon. Après avoir rangé les 1 147 données de chaque unité statistique par ordre croissant, et déterminé le nombre de classes ainsi que leur longueur, l'ensemble de l'effort peut être présenté à l'aide d'un tableau de distribution de fréquences (Tab. A). Un ensemble ainsi ordonné et classé constitue une distribution, elle peut être présentée sous forme d'une représentation graphique appelée Histogramme. Ce dernier est composé d'un ensemble de rectangles de même largeur et d'une hauteur proportionnelle à la fréquence $f(x)$ de la classe à laquelle il appartient (Fig. B).

Tableau A : Distribution de fréquences pour la circonférence de la poitrine chez les hommes

Classe	limite inf. / sup. dimension en pouce	f(x) nombre individu
1	32,5 à 33,5	1
2	33,5 à 34,5	4
3	34,5 à 35,5	16
4	35,5 à 36,5	38
5	36,5 à 37,5	81
6	37,5 à 38,5	151
7	38,5 à 39,5	212
8	39,5 à 40,5	215
9	40,5 à 41,5	187
10	41,5 à 42,5	129
11	42,5 à 43,5	61
12	43,5 à 44,5	36
13	44,5 à 45,5	9
14	45,5 à 46,5	4
15	46,5 à 47,5	2
16	47,5 à 48,5	1
		1147

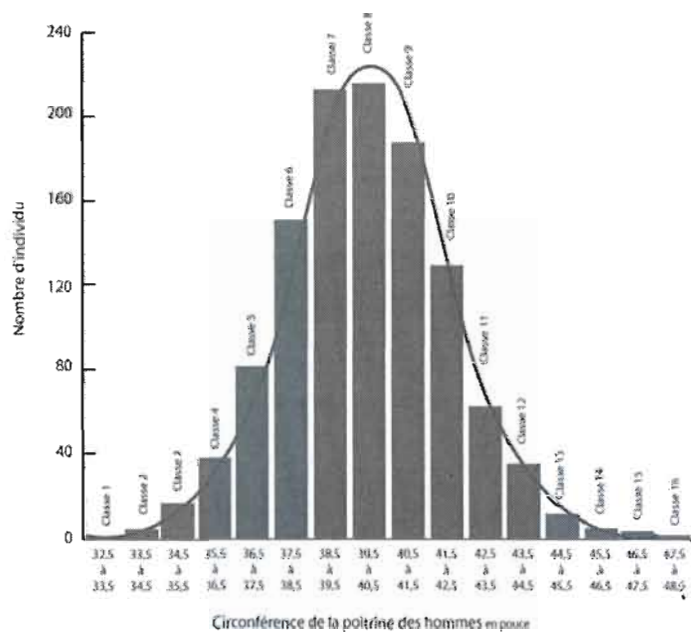


Figure B : Histogramme

Généralement en biologie, mais plus particulièrement en anthropométrie, les phénomènes suivent une distribution dite normale, représentée par la courbe de Gauss ou courbe en cloche. La distribution normale est caractérisée par la superposition du mode, de la médiane et de la moyenne, ainsi que par la symétrie de la courbe par rapport à ceux-ci. Ces paramètres de position et de dispersion n'ont de sens que si la distribution est, ou se rapproche, d'une distribution normale.

PARAMÈTRES DE POSITIONNEMENT ET DE DISPERSION

Les données dans les ouvrages anthropométriques sont exclusivement offertes en valeur absolue sur une échelle centile. Les centiles correspondent à des valeurs qui divisent un ensemble d'observations en 100 parties égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de la population. Bref, le 50ième centile ne correspond pas à 50% de la population. Les designers peuvent confondre cette notion (Vezeau, 1998).

Paramètres de dispersion

L'écart-type (σ ou s) renseigne sur la dispersion, sur l'étalement de la population autour de la moyenne. Si c'est grand, la distribution est étalée ; si c'est faible, la distribution sera resserrée autour de la moyenne. La variance est le carré de l'écart-type. Selon une courbe de Gauss, dans ce cas, la donnée de la moyenne (m) et l'écart type (σ) permettent de déterminer l'intervalle dans lequel on trouve x % de la population (Tab. B). Il serait inapproprié de faire la conception à partir de la moyenne, car l'individu moyen n'existe pas (Daniels, 1952). Alors que pour Hertzberg (op.cit.), la conception à partir des bornes centiles est plus appropriée pour satisfaire un plus grand nombre d'individus. Aujourd'hui plusieurs auteurs remettent en doute cette dernière prémisse (Zehner, op.cit.; Molenbroek, op.cit.; Roebuck, op.cit.; Robinette et McConville, op.cit.; Dainoff et al, op.cit.).

Tab B : Intervalle de confiance

$[m - \sigma ; m + \sigma]$	=	68,0%
$[m - 1,64 \sigma ; m + 1,64 \sigma]$	=	90,0%
$[m - 1,96 \sigma ; m + 1,94 \sigma]$	=	95,0%

APPENDICE C

AMPLITUDES ARTICULAIRES

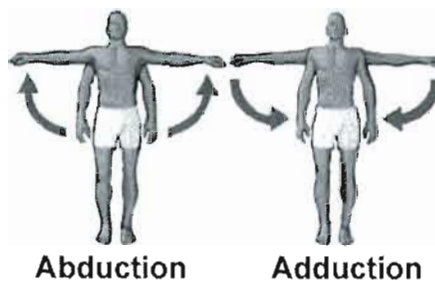
<http://www.medtrng.com/posturesdirection.htm>

Abduction

Abduction is movement away from the midline, or to abduct.

Adduction

Adduction is movement toward the midline, or to add.

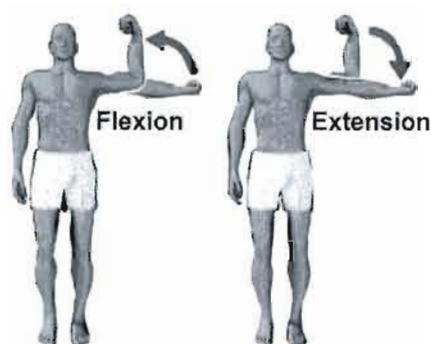


Flexion

Flexion is to bend at a joint, or to reduce the angle.

Extension

Extension is to straighten at a joint, or to increase the angle, for example, from 90 degrees to 180 degrees.

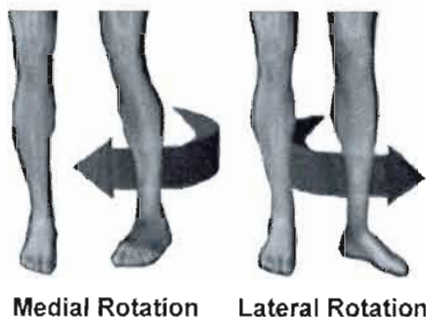


Medial Rotation

Medial rotation is to turn inward.

Lateral Rotation

Lateral rotation is to turn outward.

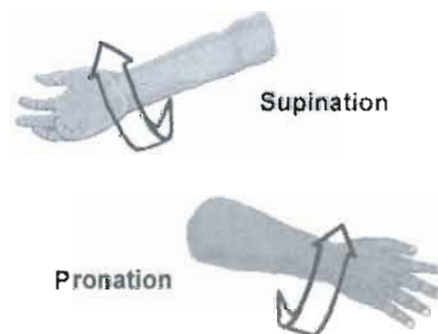


Supination

Supination is to rotate the forearm so that the palm faces forward.

Pronation

Pronation is to rotate the forearm so that the palm faces backward.



RÉFÉRENCES

1. Abdel-Malak, S., Brassard, L. et coll. (2008) « Synthèse des résultats de l'enquête sur la perception et l'utilisation du design industriel par les entreprises manufacturières québécoises » . Données électroniques. Montréal: Développement économique, innovation, exportation.
2. Allen, B., Curless, B., and Popović, Z. (2004). Exploring the space of human body shapes: data-driven synthesis under anthropometric control. In Proc. Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference. SAE International.
3. Allen, B., Curless, B., and Popović, Z. (2003). The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans. ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH), vol 22, N° 3, p. 587-594.
4. Auerhan, J., (1934). Utilisation de l'anthropométrie militaire, Revue de l'Institut International de Statistique / Review of the International Statistical Institute, vol 2, N° 1, avril, p. 78-95.
5. Baucher, J., Leborgne, P. (2006). Application d'une approche transversale de l'appareil locomoteur au confort siège. Elsevier, ITBM RBM, vol 27, n° 3, p. 133-140.
6. Blanchonette, P., (2006). Jack Human Modeling Tool : A Review, Ergonomics Australia, vol 21, juin/juillet, p. 6-13.
7. Bertillon, S., (1941). Vie d'Alphonse Bertillon, inventeur de l'anthropométrie. Paris: Galimard, 225 p.
8. Bellemare, M., Beaugrand, S., Marier, Larue, C., (2003), Les simulations centrées sur l'activité au cours de l'accompagnement ergonomique des projets industriels : deux cas de conception de cabines de véhicule dans l'industrie métallurgique. IRSST, 56 p.
9. Ben Azouz, Z., Shu, C., Lepage, R., Rioux, M., (2005). Extracting Main Modes of Human Shape Variation from 3-D Anthropometric Data. Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Canada.
10. Ben Azouz, Z., Rioux, M., Shu, C., Lepage, R., (2004). Analysis of Human Shape Variation using Volumetric Techniques. The 17th Annual Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2004). Geneva, Switzerland. July 79.

11. Ben Azouz, Z., Rioux, M., Lepage, R. (2002). 3D Description of the Human Body Shape: Application of Karhunen-Loève. Expansion to the CAESAR Database, Proceedings of the 16th International Congress Exhibition of Computer Assisted Radiology Surgery. Paris, France. Du 26 au 29 juin 2002, p. 571-576. NRC 45801.
12. Bobjer, O., Jansson, C., (1997). User participation in Hand tool design. In : Ergonomics in the design, use and selection of hand tools. Actes de séminaire, Sheffield, p. 9-15.
13. Cail, F., Aptel, M., Franchi, P., (1997). Les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur. INRS, Paris, 64 p.
14. Cavelaars, A.E.J.M., Kunst, A.E., Geurts, J.J.M., Crialesi, R., Grotvedt, L., Helmert U., (2000). Persistent variations in average height between countries and between socio-economic groups: an overview of 10 European countries. *Annals of Human Biology*. 27(4), p. 407-421.
15. Cleyet-Michaud, M., (1973). Le nombre d'Or, Paris: Presses Universitaires de France, 125 p.
16. Chaffin, D.B., Faraway, J.J., Zhang, X.D. and Woollley, C., (2000), Stature, age, and gender effects on reach motion postures. *Human Factors* 2000 ; 42, p. 408-420.
17. Chaffin, D.B., (2001). Digital human modeling for vehicle and workplace design. SAE International, Warrendale, PA.
18. Chengalur-Smith, I., Ballou, D., Pazer, H., (1999). The Impact of Data Quality Information on Decision Making: An Exploratory Analysis. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 11(6), p. 853-864.
19. Croney, J., (1971). Anthropometrics for designers. Londre: B.T. Batsford, 176 p.
20. Cushman, W. H., Rosenberg, D. J., (1991). Human factor in product design. USA: Ed. Elsevier, 340 p.
21. Czaja, S.J. (1990). Human Factors. Research Needs for an Aging Population. Washington: National Academic Press, 85 p.
22. Dainoff, M., Gordon, C., Robinette, K., Strauss, M., (2004). Guidelines for Using Anthropometric Data in Product Design. Santa Monica, CA, Human Factors and Ergonomics Society: Santa Monica.
23. Daniels, G. S. (1952). The Average Man: TN-WCRD 53-7, Wright-Patterson Air Force Base, OH: Wright Air Development Center. (AD 10 203).
24. Darses, F., (1994). Gestion des contraintes dans la résolution de problèmes de conception. Thèse de Doctorat. Dir.: Hoc, J.M., Paris VIII, 306 p.

25. Das, B., Kozey, J. W., (1999). Structural anthropometric measurements for wheelchair mobile adults. *Applied Ergonomics*, vol 30, n° 5, p. 385-390.
26. Das B., Sengupta A.K., (1996). Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach, *Applied Ergonomics*, vol 27, n° 3, p. 157-163.
27. Desrosiers, J., Hébert, R., Bravo, G., (1997). Le vieillissement de la performance des membres supérieurs des personnes de 60 ans et plus : étude longitudinale : projet PNRDS #6605-4651-403. Sherbrooke [Québec] : Centre de recherche en gérontologie et gériatrie.
28. Diffrient N., Tilley A. R., Harman D., (1981) Human scale 1/2/3, The MIT Press, Massachusetts.
29. Diffrient N., Tilley A. R., Harman D., (1981) Human scale 4/5/6, The MIT Press, Massachusetts.
30. Diffrient N., Tilley A. R., Harman D., (1981) Human scale 7/8/9, The MIT Press, Massachusetts.
31. Dooley, M., (1982). Anthropometric Modeling Programs - A Survey, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2(9), p. 17-25.
32. Duchamp, R., (1988). La conception de produits nouveaux. Ed. Hermès. Paris, 60 p.
33. Du L., Zhuang, Z., Guan, H., Xing, J., Tang, X., Wang, L., Wang Z., Wang, H., Liu, Y., Su, W., Benson, S., Gallagher, S., Viscusi, D., Chen, W., (2008). Head-and-face anthropometric survey of Chinese workers. *The Annals of occupational hygiene*, vol 52, n° 8, p. 773-82.
34. Elam, K., (2005). Géométrie du design. New York: Princeton Architectural Press, 107 p.
35. Evans, R., (1995). *The Projective Cast: Architecture and its Three Geometries*. Cambridge, MA: MIT Press, 413 p.
36. Falzon, P., (1995). Les activités de conception : réflexion introductives. *Performances humaines & techniques*, n° 74, jan-fév. 95, p. 7-11.
37. Falzon, P., Bisseret, A., Bonnardel, N., Darses, F., Detienne, F., Visser, W., (1990). Les activités de conception : l'approche de l'ergonomie cognitive. In : *Actes du colloque "Recherche sur le design : incitation, implication et interaction*. Université de technologie de Compiègne, Ed. À jour, France, p. 226-233.
38. Farkas, L. G., (1994). *Anthropometry of the Head and Face*. New York: Lippincott Williams & Wilkins ; Seconde édition, 395 p.

39. Ferreira, C., Fragoso, I., Vieira, F., Barrigas, C., Oliveira, C., Silva, L., (2004). Human Database. Storage and Tratment Applications. SAE International.
40. Fetter, W. A., (1982). A progression of human figures simulated by computer graphics, IEEE Computer Graphics and Applications, vol 2, n° 9, p. 9-13.
41. Floud, R., (2004). The origins of anthropometric history. Social Science History, summer, p. 337-343.
42. Floud, R., Wachter, K., and Gregory, A., (1990). Height, Health, and History: Nutritional Status in the United Kingdom, 1750–1980. Cambridge: Cambridge University Press.
43. Forest, F., et Leclerc, F., (1995). Anthropométrie Norme. Bureau de normalisation du Québec, NQ 9990-100, 100 p.
44. Gomes, S., Sagot, J.C., (2001). Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme: Contribution des documents numériques. Congrès Colloque Coopération, Innovation et Technologies, Troyes , FRANCE, vol 5, n° 3-4, p. 135-154.
45. Gordon, C. C., Bradtmiller, B., Churchill, T., Clauser, C. E., McConville, J. T., Tebbetts, I. O. and Walker, R. A. (1988). Anthropometric Survey of US Army Personnel: Methods and Summary Statistics. Technical Report NATICK/TR-89/044, United States Army Natick Research, Development and Engineering Center, Natick, Massachusetts.
46. Harrison, C. R., Robinette, K.M. (2005). Principles of Fit to Optimize Helmet Sizing. Proceedings of the NATO Research Technology Organization's Human Factors & Medicine Panel Symposium on Strategies to Maintain Combat Readiness During Extended Deployments: A Human Systems Approach, Prague, Czech Republic, 3-5 October, p. 6-1/16.
47. Harrison, C. R. et Robinette, K.M. (2002) CAESAR: Summary Statistics for the Adult Population (Ages 18-65) of the United States of America. AFRL-HE-WP-TR-2002-0170, United States Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate, Crew System Interface Division, 2255 H Street, Wright-Patterson AFB OH 45433-7022.
48. Hertzberg, H.T.E., (1955). Some contributions of applied physical anthropology to human engineering, Annals of the New York Academy of Science, vol 63, p. 616-29.
49. Hertzberg, H.T.E., (1968). The conference on standardization of anthropometric techniques and terminology. American Journal of Physical Anthropology, vol 28, Issue 1, p. 1-16.
50. Hitchcock, D., Lockyer, S., Cook, S. , Quigley, C., (2001). Third Age Usability and Safety - An Ergonomics Contribution to Design. International Journal of Human-Computer Studies, v.55 n.4, p. 635-643.

51. Hsiao, H., Long, D., Snyder, K., (2002). Anthropometric differences among occupational groups. *Ergonomics*, 45, p. 136-152.
52. Jeantet, A., (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. *Éléments pour une sociologie des processus de conception*. *Sociologie du travail*, n° 3, p. 291-316.
53. Jeantet A., Tiger H., Vinck D., Tichkiewitch S., (1996). La coordination par les objets dans les équipes intégrées de conception de produit, *Coopération et Conception*. Sous la direction de G.de Terssac et E.Friedberg, Toulouse : Éditions Octarès, p. 87-100.
54. Jürgens, H.W., Aune, I.A. et Pieper, U., (1990). International data on anthropometry. Occupational safety and health series, N° 65, International Labour Office, Geneva. English edition of the research report "Internationaler anthropometrischer Datenatlas", published by the Federal Institute for Occupational Safety and Health, Dortmund, Federal Republic of Germany.
55. Kihyo, J., Ochaе, K., Heecheron, Y., (2007). A generation method of representative human models at the boundary zone of a designated accommodation percentage. In of the 12th International Conference, HCI International 2007 with 8 Further Associated Conferences, p. 900-924.
56. Killen, G., (2003). Woodworking in ancient Egypt. *Ancient Egypt Magazine*, vol 3, January/February.
57. Kim, H., Han, D., Roh, Y., Kim, K., Park, Y., (2003). Facial anthropometric dimensions of Koreans and their associations with fit of quarter-mask respirators. *Industrial Health*, 41, p. 8-18.
58. Kolich, M., (2003). Automobile seat comfort: occupant preferences vs. anthropometric accommodation. *Applied Ergonomics*, n° 34, p. 177-184.
59. Kothiyal, K., Tettey, S., (2001). Anthropometry for Design for the Elderly. *International Journal Occupational Safety and Ergonomics*, vol 7, N°. 1, p. 15-34.
60. Kroemer, K.H.E., Kroemer, H.B., Kroemer-Elbert, K.E., (2000). *Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency*. 2e éd. Prentice: Hall.
61. Laugier, C., Mendoza, C.A., and Sundaraj, K., (2001). Towards a realistic medical simulator using virtual reality and force feedback. *International Symposium in Research Robotics, ISRR-2001*, Australia.
62. Lebahar, J.C., (1997). La simulation, instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. In : Béguin, P., Weill-Fassina, A., *La simulation en ergonomie : Connaître, Agir et interagir*. Ed. Octare, p. 77-96.
63. Le Corbusier (Charles Edouard Jeanneret), (2000). *The Modulor and Modulor 2*. Basel: Birkhäuser.

64. Liu, Bor-Shong, (2008). Incorporating anthropometry into design of ear-related products. *Applied Ergonomics*, n° 39, p. 115-121.
65. Miller, K., (2000). Biomechanics of soft tissues. *Medical Science Monitor*, 6(1), p. 158-167.
66. Moline, J., (1997). Virtual reality for health care: a survey. In *Virtual Reality in Neuro-Psycho-Physiology*, G. Riva Editor, Ios Press, Amsterdam.
67. Molenbroek, J.F.M. et Bruin, R., (2005). Enhancing the use of anthropometric data. In D de Waard, KA Brookhuis, R van Egmond et TH Boersema (Eds.), *Human factors in design, safety, and management*, Maastricht: Shaker Publishing, p. 289-297.
68. Monod, H., Kapitaniak, B., (2003). *Ergonomie*. 2e. éd. Paris: Masson, 1 vol 282 p.
69. Ogden CL, Fryar CD, Carroll MD, Flegal KM., (2004). Mean body weight, height, and body mass index, United States 1960--2002. Advance data from vital and health statistics; n° 347. Hyattsville, MD: US Department of Health and Human Services, CDC, National Center for Health Statistics.
70. Olivier, G., (1965). *Morphologie et types humains*. Paris: Vigot Frère, 170 p.
71. Ostwald, M. J., (2001). Le Corbusier (Charles Edouard Jeanneret) The Modulor and Modulor 2, *Nexus Network Journal*, p. 145-147.
72. Ouhaddi, H. et Horain, P., (1998). Conception et ajustement d'un modèle 3D articulé de la main. Actes des 6^{èmes} Journées de Travail du GT Réalité Virtuelle, Institut National des Télécommunications, 12-13 mars.
73. Owings, C. L., Chaffin, D. B., Snyder, R. G., Norcutt, R. H., (1975). Strength characteristics of U.S. children for product safety design. Final report, Corporate Author: University of Michigan, Ann Arbor.
74. Panero, J., Zelnik, M., (1979). *Human Dimension & Interior space*. Withney Library of design, New York.
75. Pheasant, S., (2006). *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design at work*. 3e Éd. UK: Taylor & Francis, 244 p.
76. Pinto, L.J., Taneja, N., (2005). Use of digital anthropometric mannequins for human engineering evaluation of workstations in aviation. *Ind J Aerospace Med*, 49(1).
77. Quarante, D., (1998). Le raisonnement analogique. Compte rendu de la journée d'étude sur l'analogie. CQP2-CREPCO. 30 avril 1998. Compiègne, 5 p.
78. Quetelet, A., (1835). *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou essai de physique sociale*. Paris: Bachelier. 327 p.

79. Quigley, C., Southall, D., Freer, M., Moody, A., Porter, M., (2001). Anthropometric study to update minimum aircraft seating standards. Report prepared for the Joint Aviation Authorities.
80. Rebiffé, R. Guillien, J. Pasquet, P., (1982). Enquête anthropométrique sur les conducteurs français. Laboratoire de physiologie et biomécanique de l'association Peugeot Renault, France: Rueil-Malmaison, 234 p.
81. Reed, M., Roe, R.W., Schneider, L., (1999). Design and Development of the ASPECT Manikin. SAE Paper N° 1999-01-0963. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
82. Reed, M.P., Schneider, L.W., Ricci, L.L., (1994). Survey of Auto Seat Design Recommendations for Improved Comfort. Report n° UMTRI-94-6. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI, USA.
83. Robinet, P., Luzi, F., Guillien, J., (2007). Campagne Nationale de Mensuration 2003-2005 : principaux résultats et impacts sur la conception des équipements. Actes du 42e congrès de la SELF.
84. Robinette, K.M., Daanen, H., (2005). Precision of the CAESAR scan-extracted measurements. *Applied Ergonomics*, N° 37, p. 259-265.
85. Robinette, K.M., Daanen, H., (2003). Lessons learned from CAESAR: A 3-D anthropometric survey. Air Force Research Laboratory and The Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO) Human Factors.
86. Robinette, K. M. et McConville, J.T., (1981). An Alternative to Percentile Models. SAE Technical Paper 810217. 1981 SAE Transactions. Warrendale, PA, Society of Automotive Engineers: 938-946.
87. Roe, R. W., (1993). Occupant Packaging, In B. Peacock and W. Karwowski (Eds.), *Automotive Ergonomics*, London: Taylor and Francis. p. 11-42.
88. Roebuck, J.A., (1995). *Anthropometric Methods: Designing to Fit the Human Body*. Human Factors & Ergonomics Society. 194 p.
89. Rouse, W. B., (2002). Need to know: Information, knowledge, and decision making. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*. Part C, Applications and reviews, vol 32, n° 4, p. 282-292.
90. Ruisseau, J.Y., Carrier, R., Chamberland, A., (2001). Habillement et mannequin numérique : une approche des contraintes d'une modélisation réaliste. Comptes rendus du congrès SELF-ACE 2001. Les transformations du travail, enjeux pour l'ergonomie.
91. Sagot, J.C., (1999). *Ergonomie et conception anthropocentrée*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches. ENSGSI, Institut national de polytechnique de Lorraine. 267 p.

92. Sagot, J.C., Gomes S., Zwolinski, P., (1998). Innover en intégrant l'ergonomie dans le processus de développement de produits. Journées de sensibilisation "Ergonomie et Prévention dans le processus d'innovation" - INRS, Nancy, p. 31-36.
93. Schamber, L., Eisenberg, M. B., et Nilan, M. S. (1990). A re-examination of relevance: Toward a dynamic, situational definition. *Information Processing & Management*, 26, p. 755-776.
94. Snyder, R., Schneider, L., Owings, C., Reynolds, H., Golomb, H., Schork, M. (1977). Anthropometry of Infants, Children, and Youth to Age 18 for Product Safety Design (Prepared for Consumer Product Safety Commission, Bethesda, Md. Final Report UM-HSRI-77-17, Highway Safety Research Institute, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan. May.
95. Snyder, R., Spencer, M.L., Owings, C., Schneider, L.W. (1975). Physical Characteristics of Children as Related to Death and Injury for Consumer Product Safety Design. (Prepared for Consumer Product Safety Commission, Bethesda, Md. Final Report UM-HSRI-BI-75-5, Highway Safety Research Institute, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
96. Sokal, R., Rohlf, J., (1981). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*, 3rd edition. W. H. Freeman and Co.: New York.
97. Stoudt, H.W., (1979). Are people still getting bigger? SAE paper 780280, May, Warrendale, PA: Society of automotive Engineers, Inc.
98. Stoudt, H.W., Damon, A., McFarland, R., and Roberts, J. (1965). Weight, Height, and Selected Body Dimensions of Adults, United States, 1960-1962. Public Health Service Publication N° 1000, Series 11, N° 8, U.S. Government Printing Office, Washington.
99. Statistique Canada, (2007).
http://www.statcan.ca/francais/edu/power/ch13/sample/sample_f.htm
100. Statistique Canada., (2006). Rapports sur la santé. vol 17, n° 3, août 2006 (n° 82-003-XIF2005003 au catalogue). Pour accéder au rapport : www.statcan.ca [consulté le 29 août 2006].
101. The National Center for Health Statistics, The Third National Health and Nutrition Examination Survey, (NHANES III 1988-1994) ; Multiple Imputed Data Sets on CD-Rom Vital and Health Statistics, (Series 11, n° 7A, Hyattsville MD. June 2001. ANSUR database, 1988.
102. Tilley, A.R., (1993). *The measure of man and woman: human factors in design*. New York: Whitney Library of Design.

103. Trépanier, M., Gosselin, P.M., (2007). Faire du design industrielle au Québec: Étude sur les pratiques professionnelles des designers industriels québécois. INRS-UCS et INRPME/UQTR, Montréal, juillet, 39 p.
104. Troy, J. et Guerin, J., (2004). Human Swept Volumes. SAE transactions, vol 113, n° 1, p. 249-253.
105. Unger, R. A., (1996). The CSERIAC ANthropometric Data Files. Gateway, vol 7, N° 2, p. 7.
106. Veitch, D., Robinette, K., (2006). World Engineering Anthropometry Resource (WEAR): A Review. Paper presented at the Annual Conference of the Human Factors and Ergonomics Society of Australia, Sydney, New South Wales.
107. Vezeau, S., (2004). Apports des utilisateurs et méthodes d'investigation de l'activité dans un processus de design d'outils manuels : de la parole au geste du plâtrier. Thèse de Doctorat, EPHE, Paris. Dir. : Antoine Laville / Annie Weill-Fassina. 336 p.
108. Vezeau, S., Gagné, N., Lemay, C., Labrie, D., (1999). Conception ergonomique et participation des utilisateurs : le cas d'un cabinet de sablage au jet. Travail & Santé, p. 6-10.
109. Viktor, H.L. and Paquet, E., (2005). Anthropometric Calibration of Virtual Mannequins through Cluster Analysis and Content-based Retrieval of 3-D Body Scans. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC2005, vol 2, 16-19 May, Ottawa, Canada, p. 1458-1463.
110. Viktor, H.L., Paquet, E., Guo, H. (2006). Measuring to Fit: Virtual Tailoring through Cluster Analysis and Classification, The 17th International European Conference on Machine Learning and the 10th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML/PKDD 2006). Berlin, Allemagne. Du 18 au 22 septembre. NRC 48749.
111. Visser, W., (1990). More or less following a plan during design: opportunistic deviations in specification. International journal of man-machine studies, n° 33, p. 247-278.
112. Wang X., Dolivet C., Nicolas B., Minguy, J.L., (2003). Apport d'enquête de terrain puis d'une simulation 3D par mannequin numérique pour l'aménagement spatial d'un poste de conduite de grue portuaire à conteneurs. Recherche Transports Sécurité, 78, p. 43-61.
113. Weber, K., Lehman, R. J., Schneider, L. W., (1985). Child anthropometry for restraint system design. Corporate Author: University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute. 35 p.
114. Wiklund, M., Rudnick, J., Liberatore, J., (2006). Addressing Women's Needs in Surgical Instrument Design. Originally Published MDDI November.

115. Woodson, W.E., Tillman, B., Tillman, P., (1992). Human Factors in design handbook : Information and guidelines for the design systems, facilities, equipment and products for human use. 2e Éd. McGraw-Hill. NY. 846 p.
116. Yang, J., Marler, T., Beck, S., Kim, J., Wang, Q., Zhou, X., Pena Pitarch, E., Farrell, K., Patrick, A., Potratz, J., Abdel-Malek, K., Arora and Nebel, K., (2006). New Capabilities for the Virtual-Human Santos. SAE 2006 World Congress, April, Detroit, MI, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
117. Yokota, M., (2003). Head and facial anthropometry of mixed-race US Army male soldiers for military design and sizing: A pilot study. Applied Ergonomics, n° 36, p. 379-383.
118. Zehner, G.F. (1996). Cockpit anthropometric accommodation and the JPATS program. SAFE Journal, vol 26, n°. 3, p. 19-24.